

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Синькевич Андрей Александрович

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Характеристики конвекции и грозовых облаков по результатам натурных измерений и численного моделирования	13
1.1 Конвективная неустойчивость атмосферы и ее оценки	13
1.2 Радиолокационные характеристики грозовых облаков, характеристики при переходе в грозовую стадию	20
1.3 Электрическая структура и характеристики грозовых облаков.....	20
1.4 Выводы к главе 1.....	28
Глава 2. Исследования грозовых облаков с использованием данных радиолокационных и систем регистрации грозовых разрядов в различных регионах России и в Индии.....	29
2.1 Методика исследования и данные.....	29
2.2 Характеристики грозовых облаков в Индии (штат Махараштра).....	34
2.3 Развитие многоячейкового грозового облака в Индии (штат Махараштра).....	38
2.4 Характеристики грозовых облаков в Индии муссонного и постмуссонного периода (штат Карнатака).....	41
2.5 Сравнительные характеристики облаков, переходящих в грозовую стадию, для различных регионов РФ и Индии	48
2.6 Линейные связи между электрическими и радиолокационными характеристиками грозовых облаков	53
2.7 Выводы к главе 2.....	65
Глава 3. Результаты моделирования грозовых облаков при помощи моделей конвективных облаков	67
3.1 Численные модели конвективных облаков	67
3.1.1 Полуторамерная модель конвективного облака.....	67
3.1.2 Трехмерная нестационарная модель конвективного облака.....	70
3.1.3 Доработка численных моделей	73
3.2 Результаты моделирования развития грозовых облаков	75

3.2.1 Динамика пространственного распределения зарядов и напряженности электрического поля в облаке и вне него (29 мая 2012 г., Пятигорск).....	75
3.2.2 Влияние аэрозольного загрязнения на характеристики облаков (11 августа 2017 г., Пекин).....	78
3.2.3 Влияние гетерогенного замерзания капель на характеристики облаков (22 июля 2017 г., Санкт-Петербург).....	81
3.2.4 Пространственное распределение восходящих (нисходящих) потоков в облаке и плотности объемного заряда (18-19 июня 2020 г., Санкт-Петербург).....	82
3.2.5 Оценка физического эффекта воздействий льдообразующим реагентом (14 мая 2012 г., Северный Кавказ).....	85
3.2.6 Учет возмущений температуры внутри облака при выполнении активных воздействий льдообразующим реагентом (1 мая 2021 г., Северный Кавказ).....	86
3.3 Характеристики облаков, переходящих в грозовую стадию.....	89
3.4 Применение мезомасштабной модели для определения грозового положения.....	97
3.4.1 Модель WRF и методика исследования.....	97
3.4.2 Результаты воспроизведения стратификации атмосферы в мезомасштабной модели.....	99
3.4.3 Применение модели конвективного облака (малой размерности) для уточнения параметров грозового облака с использованием данных мезомасштабной модели.....	103
3.5 Результаты ансамблевого прогноза характеристик грозовых облаков на базе модели малой размерности.....	105
3.5 Выводы к главе 3.....	113
Заключение.....	116
Список используемых источников.....	119
Приложения.....	134
Приложение А. Гистограммы распределений радиолокационных и электрических характеристик грозовых облаков (4 октября 2015 года, штат Махараштра, Индия).....	134
Приложение Б. Вертикальные сечения многоячейкового облака (04.10.2015, штат Махараштра, Индия).....	136
Приложение В. Версии численной нестационарной полуторамерной модели конвективного облака.....	137

Приложение Г. Основные уравнения трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака.....	138
Приложение Д. Результаты трехмерного численного моделирования грозового облака в Китае, Пекин (11 августа 2017 г.).....	145
Приложение Е. Результаты трехмерного численного моделирования грозо-градового облака в Санкт-Петербурге (22 июля 2017 г.)	148
Приложение Ж. Акты внедрения	150

Введение

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).

На сегодняшний день в России целый ряд научных институтов, в т.ч. входящих в структуру Росгидромета, продолжают многолетние исследования в области физики грозы и ее климатологии, среди них Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург), Высокогорный геофизический институт (Нальчик), Центральная аэрологическая обсерватория (Москва), Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (Москва), Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН (Нижний Новгород), Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (ГО «Борок» ИФЗ РАН, в частности), Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск), Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ (Москва), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург), Российский государственный гидрометеорологический университет (Санкт-Петербург) и др. Работы ведущих специалистов, выполняющих исследования в этой области, публикуются в высокорейтинговых российских и мировых научных изданиях, приведенные там результаты высокого уровня представляют интерес для всего мирового сообщества специалистов.

Особую актуальность указанные исследования имеют в свете изменения климата, одним из проявлений которого является изменения частоты и интенсивности в различных регионах по-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 грозовых разрядов (Индия), обобщение данных радиолокационных наблюдений для различных регионов, участие в доработке численных моделей (совместно с другими членами коллектива), 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. Объединенный семинар ФГБУ «ГГО» (2026 г.)
2. Ученый совет ФГБУ «ГГО» (2026 г.)
3. III Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» (Санкт-Петербург, 2019)
4. VI Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, 2020)
5. IV Международная научная конференция ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ, КЛИМАТОЛОГИИ И МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (Ставрополь, 2022)

6. VI Международная конференция "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л. Н. Карлина / MGO-2022» (Санкт-Петербург, 2022)
7. II Международная научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития» (Санкт-Петербург, 2024)
8. 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)
9. 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.

По теме диссертации опубликовано **20** научных работ в рецензируемых журналах. Из них: **13** – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации для публикации основных результатов диссертационных исследований; **19** – в журналах, индексируемых в РИНЦ; **17** – в журналах, индексируемых в RSCI; **12** – в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Список опубликованных работ:

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 грозových 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., Довгальюк Ю. А., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Михайловский Ю. П., Богданов Е. В., Торопова М. Л., Игнат'ев 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. *[Переводная версия]* Sin'kevich A.A., Dovgalyuk Y.A., Veremei N.E., Kurov A.B., Mikhailovskii Y.P., Bogdanov E.V., Toropova M.L., Ignat'ev A.A., Adzhiev A.Kh., Abshaev A.M., Malkarova A.M., Gopalakrishnan V., Murugavel P., Pawarr S.D. Investigations of the development of thunderstorm with hail. Part 3. Numerical simulation of cloud evolution // Russian meteorology and hydrology. 2017. Vol. 42. No. 8. Pp. 494-502. doi: 10.3103/S1068373917080027.
9. Попов В.Б., Синькевич А.А., Янг Дж., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгальюк 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. *[Переводная версия]* Popov V.B., Sin'kevich A.A., Mikhailovskii Y.P., Toropova M.L., Dovgalyuk Y.A., Veremei N.E., Yang J., Starykh D.S. Characteristics and structure of the cumulonimbus cloud with waterspout over the Gulf of Finland. // Russian meteorology and hydrology. 2020. Vol. 45. No. 9. Pp. 607-614. doi: 10.3103/S1068373920090010.
10. Довгальюк 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 грозového облака в Китае // Метеорология и гидрология. 2020. №10. С. 63-72. *[Переводная версия]* Dovgalyuk Y.A., Veremei N.E., Sin'kevich A., Mikhailovskii Y.P., Toropova M.L., Popov V.B., Lu J., Yang J. Investigation of electrification mechanisms and relationship between the electrical discharge frequency and radar characteristics of the thunderstorm in China. // Russian meteorology and hydrology. 2020. Vol. 45. No. 10. Pp. 712-719. doi: 10.3103/S1068373920100052.
11. Синькевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгальюк 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. *[Переводная версия]* Sin'kevich A.A., Popov

- V.B., Mikhailovskii Y.P., Toropova M.L., Dovgalyuk Y.A., Veremei N.E., Starykh D.S. Characteristics of cumulonimbus with waterspout over Ladoga lake from remote measurements. // Atmospheric and oceanic optics. 2020. Vol. 33. No. 4. Pp. 387-392. doi: 10.1134/S1024856020040156.
12. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Попов В.Б., Старых Д.С., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е. Структура 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. [Переводная версия] Sin'kevich A.A., Mikhailovskiy Y.P., Toropova M.L., Popov V.B., Dovgalyuk Y.A., Veremei N.E., Starykh D.S. Thunderstorm with waterspout structure and the dependence lightning frequency on its characteristics. // Atmospheric and oceanic optics. 2020. Vol. 33. No. 6. Pp. 645-649. doi: 10.1134/S1024856020060226.
13. 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.
14. 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. [Переводная версия] Sin'kevich A.A., Popov V.B., Abshaev A.M., Boe B., Pawar S.D., Mikhailovskii Yu.P., Gopalakrishnan V., Gekkieva Zh. Radar characteristics of convective clouds during transition to the cumulonimbus stage in different regions of the world. Vol. 34. No. 2. Pp. 134-139. doi: 10.1134/S1024856021020081.
15. 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.
16. 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. [Переводная версия] Sin'kevich A.A., Toropova M.L., Mikhailovskii Yu.P., Popov V.B., Pawar S., Gopalakrishnan V. Features of the Relationship between Electrical and Radar Parameters of Thunderclouds in India (Field Studies). // Russian Meteorology and Hydrology. 2021. Vol. 46(6). Pp. 410-415. Doi: 10.3103/S106837392106008X.

17. 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. [Переводная версия] Mikhailovsky, Y.P., Toropova, M.L., Veremei, N.E. et al. Dynamics of the Electrical Structure of Cumulonimbus Clouds // Radiophys Quantum El. 2021. Vol. 64. Pp. 309–320. Doi: 10.1007/s11141-022-10133-y.
18. 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. [Переводная версия] Dovgalyuk Y. A., Veremei N. E., Sinkevich A. A. [et al.] Effects of High Aerosol Air Pollution on the Evolution of Convective Clouds during a Thunderstorm in China According to Three-dimensional Numerical Simulations // Russian Meteorology and Hydrology. – 2022. – Vol. 47. – No 3. – P. 197-206. – DOI 10.3103/S1068373922030050.
19. 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. [Переводная версия] Mikhailovskii, Y.P., Zainetdinov, B.G., Sin'kevich, A.A. et al. On Effectiveness of Monitoring the Electrical State of Clouds by Remote Radiophysical Instruments in the Near Zone. Atmos Ocean Opt 35, 371–377 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1024856022040121>
20. Торопова М. Л., Синькевич А. А., Павар С., Гопалакришнан В., Михайловский Ю. П. Характеристики грозных облаков муссонного и постмуссонного периодов в Индии // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 68-79. [Переводная версия] Toropova, M.L., Sin'kevich, A.A., Pawar, S. et al. Characteristics of Thunderstorms during the Monsoon and Post-monsoon Seasons in India. Russ. Meteorol. Hydrol. 47, 620–628 (2022). <https://doi.org/10.3103/S1068373922080088>

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

Глава 1. Характеристики конвекции и грозовых облаков по результатам натурных измерений и численного моделирования

В Главе 1 приведен обзор литературы, посвященной исследованиям грозовых облаков и характеристик неустойчивости атмосферы. Обзор включает следующие направления исследований:

- Понятие конвекции и конвективной неустойчивости атмосферы, способы ее оценки;
- Исследования и характеристики грозовых облаков с использованием радиолокаторов, изменения параметров облаков при переходе в грозовую стадию;
- Характеристика электрической активности грозовых облаков по данным систем мониторинга грозовой активности, датчиков приземной напряженности электрического поля и прочих геофизических измерений;
- Исследования региональных особенностей формирования и развития грозовых облаков;
- Моделирование грозовых облаков – с использованием моделей отдельных облаков и моделей атмосферы, воспроизведение характеристик облаков и их электрической структуры, использование параметризаций молниевой активности в климатических моделях.

Обзор разделен на три подраздела по предметам исследования: п.1.1 посвящен исследованиям, затрагивающим конвективную неустойчивость атмосферы и ее оценки; в п.1.2 рассмотрены радиолокационные исследования грозовых облаков и характеристики при переходе в облаков грозовую стадию (при регистрации первых электрических разрядов); в п.1.3 рассматриваются исследования электрической структуры грозового облака и электрические характеристики грозовых облаков и атмосферы, полученные как при помощи натурных измерений, так и с использованием численных моделей.

1.1 Конвективная неустойчивость атмосферы и ее оценки

Конвекция в атмосфере – это перенос воздуха с вертикальной составляющей. Конвективными облаками называют обособленные облачные массы, имеющие значительную вертикальную протяженность и небольшие горизонтальные размеры (относительно слоистообразных облаков), возникающие в результате конвективных движений в атмосфере. В морфологической классификации облаков они образуют семейство облаков вертикального развития [1]. Основной причиной возникновения конвективных облаков называют термическую конвекцию и турбулентный обмен в атмосфере [2, 3]. Конвекцию разделяют на: *свободную*, вызванную действием гидростатических сил; *вынужденную*, когда действие гидростатических сил не является определяющим (фронтальные зоны, орографический подъем). В общем случае

под термином *конвекция* принято понимать свободную конвекцию.

Конвекция в атмосфере может быть нерегулярной (неупорядоченно, хаотической) или же регулярной (упорядоченной, ячейковой). Во втором случае образуются геометрически правильные циркуляционные ячейки [4]. Кроме того, конвективные облака могут образовывать различные мощные мезомасштабные структуры, такие как *мезомасштабные конвективные системы* (МКС), *мезомасштабные конвективные комплексы* (МКК), *мезомасштабные конвективные вихри* (МКВ), *суперячейковые* кучево-дождевые облака [5].

Необходимым условием для развития конвекции является наличие *статической* (*конвективной*) неустойчивости в атмосфере, особенно в нижних ее слоях. Конвективная неустойчивость обусловлена действием силы плавучести, которая определяется вертикальным распределением температуры и возникает в результате неравномерного прогрева воздуха [2, 6, 7]. Анализ неустойчивости атмосферы традиционно выполняется с использованием аэрологических диаграмм различного типа – эмаграмм, тефиграмм и др. [8].

Существуют различные способы оценки неустойчивости. Наиболее простой критерий состоит в оценке градиента температуры всплывающей частицы γ и следует из *метода частицы*. Метод частицы предполагает, что подъем частицы происходит адиабатически, т.е. без обмена теплом с окружающей средой. Ниже уровня конденсации частица поднимается вдоль сухой адиабаты, выше – вдоль влажной адиабаты (т.к. выделяется скрытая теплота конденсации и температура частицы падает). При этом на частицу действуют две противоположно направленные силы: сила гравитации и Архимедова сила. Результирующую этих сил называют *силой плавучести*. На рис. 1.1 показаны изменения температуры всплывающей частицы. Ниже уровня конденсации z_k градиент температуры всплывающей частицы γ сравнивают с сухоадиабатическим градиентом γ_a , выше уровня конденсации частица находится в насыщенном состоянии и γ сравнивают с влажноадиабатическим градиентом $\gamma_{ва}$.

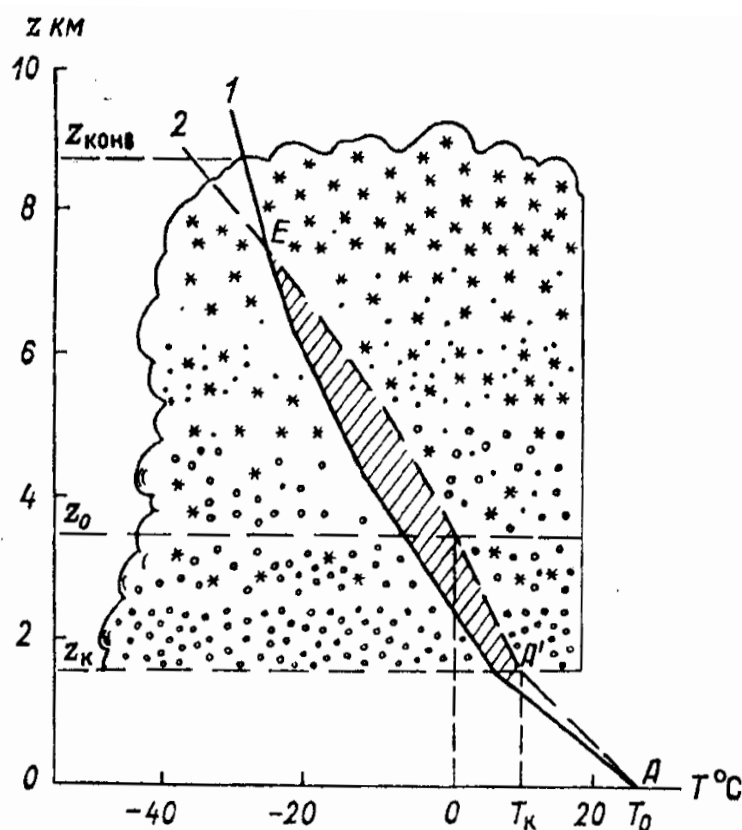


Рисунок 1.1 - Схема кучево-дождевого облака: 1 – кривая стратификации, 2 – кривая состояния [2]

Выделяют следующие виды стратификации атмосферы по отношению к сухо- и влажноадиабатическому движению [2]:

- 1) $\gamma > \gamma_a > \gamma_{ва}$ - сухо- и влажнонеустойчивая (абсолютно неустойчивая);
- 2) $\gamma_a = \gamma > \gamma_{ва}$ - сухобезразличная и влажнонеустойчивая;
- 3) $\gamma_a > \gamma > \gamma_{ва}$ - сухоустойчивая и влажнонеустойчивая;
- 4) $\gamma_a > \gamma = \gamma_{ва}$ - сухоустойчивая и влажнобезразличная;
- 5) $\gamma < \gamma_{ва} < \gamma_a$ – сухо- и влажноустойчивая (абсолютно устойчивая).

Другой подход к оценке неустойчивости атмосферы реализует *метод слоя* [9], развитый в работах Шишкина Н. С. [10].

Оценки неустойчивости гроз традиционно используются при прогнозе грозового положения. Среди классических методов, применяемых в России, можно назвать следующие: метод Лебедевой; метод Пескова; метод Решетова; метод Сосина, метод Глушковой, Лапчевой; метод Седлецкого; метод Заводченкова; метод Ягудина [11]. В настоящее время большое распространение получили используемые в целях прогноза разнообразные параметры, так или

иначе характеризующие конвективную неустойчивость, рассчитываемые на основании вертикального распределения температуры, влажности и др. характеристик в атмосфере (изначально - по данным аэрологического зондирования атмосферы). Зачастую такие параметры предназначены не столько для прогноза гроз, сколько для оценки возможности развития опасных конвективных в целом (или отдельных их групп) [12]. Среди десятков параметров неустойчивости можно назвать наиболее часто используемые:

- CAPE (Convective Available Potential Energy - доступная конвективная потенциальная энергия), рассчитываемая как на основе температуры, так и с использованием виртуальной температуры, а также при подъеме частицы от различных уровней и для различных слоев атмосферы;
- CIN (Convective Inhibition – конвективное подавление);
- SHOW (индекс Шоултера);
- Lifted index;
- SWEAT (Severe WEATHER Threat index, SWI);
- K index (DJ, индекс неустойчивости Джорджа, он же индекс/метод Вайтинга);
- TT (Total Totals index – TOTL).

Указанные параметры используются как для прогноза, так и для диагноза наличия ОКЯ и оценки потенциала развития опасных явлений на исследуемой территории. Последнее особенно важно в свете большого внимания, уделяемого вопросам изменения климата и климатической изменчивости. Так, масштабное исследование условий, характерных для развития опасных конвективных явлений в России [13], определяемых на основании параметров неустойчивости атмосферы, рассчитанных по данным реанализа ERA5, показало, что изменения значений этих параметров имеют разную направленность в различных регионах и согласованность этих изменений с изменениями повторяемости ОЯ требует отдельного рассмотрения. В полярных регионах отмечено хоть и небольшое по величине, но значимое уменьшение CAPE; уменьшение значений доступной конвективной потенциальной энергии получено и на юге Европейской территории России. На побережье Черного моря и на юге Сибири, наоборот, наблюдается увеличение CAPE, сопровождающееся усилением конвективного подавления (CIN). Аналогичные расчеты с использованием данных глобальных климатических моделей не отражают такие региональные особенности. В исследовании [14] на основании анализа параметров неустойчивости атмосферы, рассчитанных с использованием реанализа ERA5, показано, что границы зоны активной конвекции на территории Западной Сибири в течение последних 30 лет сдвигались на север.

Многочисленные работы посвящены исследованию изменениям характера и частоты

опасных конвективных явлений при сценарном прогнозе изменений климата. Так, в работе [15] по данным конвективно-разрешающей модели WRF-ARW получено ожидаемое увеличение значений μCAPE и μCIN в течение XXI века на рассматриваемой территории (США).

Принято считать, что характеристики неустойчивости атмосферы и, как следствие, пороговые значения параметров неустойчивости, имеют региональные особенности, что подтверждается исследованиями. В работе [16] проанализированы многолетние ряды индексов неустойчивости атмосферы в районе космодрома Восточный, рассчитанные по данным аэрологического зондирования на станции Благовещенск для дней с грозами и ливнями. Хотя ряды наблюдений дней с грозой по различным (даже близлежащим станциям) и демонстрируют достаточно большую пространственную изменчивость, показано, что значения параметров неустойчивости атмосферы для гроз на отдельных станциях и повсеместных гроз имеют статистически незначимые отличия. Продемонстрировано, что уточненные пороговые значения индексов неустойчивости для различных ОЯ отличаются от аналогичных показателей, рассчитанных для территории Западной Сибири. Наибольшие отличия при дифференциации ОЯ (гроза с ливнем и ливень) показали индексы CAPE, SWEAT, LIFT.

Выполненные в работе [17] оценки успешности прогноза развития опасных конвективных явлений при помощи 17 параметров неустойчивости, рассчитанных по данным глобальных моделей GFS и GEM на территории Пермского края, показали, что все рассмотренные параметры имеют те или иные недостатки. Так, при чрезвычайно высоких значениях оправдываемости отсутствия и предупрежденности наличия опасных явлений наблюдается низкая общая оправдываемость; при высокой общей оправдываемости и оправдываемости отсутствия явления – низкая оправдываемость наличия и т.д. Авторы выделяют в качестве наиболее успешных для прогноза опасных конвективных явлений индексы Томпсона, Вайтинга и индекс потенциальной неустойчивости.

В связи с недостаточным покрытием территорий станциями аэрологического зондирования [18], вместо радиозондовых наблюдений в качестве данных для оценки строения атмосферы могут использоваться результаты «восстановленных» по результатам численного моделирования радиозондов – по данным глобальных и региональных моделей, включая данные реанализа и спутниковых наблюдений (как было сделано в упомянутых выше по тексту исследованиях). Это позволяет получать данные на регулярной сетке и с достаточно большой заблаговременностью. Однако вертикальные распределения давления, температуры и влажности в атмосфере, используемые для расчетов параметров неустойчивости, имеют свои погрешности – в зависимости от источника данных.

Отдельное направление исследований связано с оценкой качества восстановленных

различными способами данных радиозондирования и значений параметров неустойчивости, рассчитанных по таким данным [19–21]. Так, в исследовании [20] выполнен анализ соответствия параметра неустойчивости Total Totals index, рассчитанного для Арктических территорий России на основании реанализа ERA5 и измерений на аэрологических станциях. Показано достаточно хорошее соответствие - отличия не превышают 10 единиц измерения индекса (по абсолютному значению). Сделан вывод о перспективности применения параметра TOTL для прогноза и диагноза гроз в указанном регионе. А в статье [19] приведены результаты исследования качества воспроизведения данных радиозондирования по глобальной модели GFS (с заблаговременностью 48 часов) при помощи корреляционного анализа. Сравнение с данными аэрологического зондирования на станции Минеральные Воды показало, что, хотя в целом соответствие температуры и температуры точки росы достаточно хорошее, данные демонстрируют некоторые погрешности. Так, коэффициент корреляции температуры на большинстве рассмотренных изобарических уровней составил 0,95 и больше, однако на уровне 300 гПа его значение было равно 0,89. Для температуры точки росы полученные значения коэффициентов корреляции в целом меньше: от 0,88 до 0,96 от поверхности земли до 700 гПа, 0,8 для слоя 600 – 400 гПа и 0,77 для верхнего рассмотренного уровня 300 гПа.

Расширяется использование современных статистических методов и методов машинного обучения, где параметры неустойчивости атмосферы ложатся в основу статистических моделей и моделей на основе технологий машинного обучения и искусственного интеллекта [22–24].

Исследование, выполненное для регионов Шри-Ланки, а также Северной и Центральной Европы [22] показало, что в указанных регионах наиболее успешными являются различные наборы предикторов грозовой активности. Модели, построенные при помощи методов машинного обучения, продемонстрировали, что в Европе при прогнозе возникновения гроз и глубокой конвекции лучшие результаты показывают параметры неустойчивости, в то время как на Шри-Ланке определяющей является влажность атмосферы. Показано, что использование методов машинного обучения позволяет значительно улучшить прогноз.

Разработанная стохастическая параметризация различных типов конвекции (мощных кучевых облаков и глубокой конвекции), взаимодействующих между собой, основанная на использовании радиолокационных предикторов с применением байесова подхода, показала многообещающие результаты [25].

В работе [23] предложен метод прогноза града, основанный на использовании дискриминантной функции и параметров неустойчивости атмосферы по выходным данным глобальной модели атмосферы. Разработаны логистические модели прогноза грозовой активности и града опасного размера на основании данных реанализа для различных

географических регионов (районов Европы и США) [24].

Исследования грозовой активности в тропиках и субтропиках с использованием спутниковых наблюдений за молниевой активностью (TRMM) и характеристик атмосферы по данным реанализа (MERRA-2) показали связь между наличием молниевых разрядов и параметрами неустойчивости [26]. Продемонстрировано, что наиболее важными для предсказания разрядов являются доступная конвективная потенциальная энергия (CAPE), высота уровня конденсации (LCL) и интегральное влагосодержание в столбе воздуха. Перечисленные параметры и некоторые другие (в том числе географическая широта) были использованы для построения модели логистической регрессии, которая легла в основу новой параметризации молниевой активности и показала точность предсказания разрядов 86%.

Таким образом, анализ строения атмосферы и характеристики ее конвективной неустойчивости не потеряли своей актуальности и находят свое применение в исследованиях грозовых облаков и грозовой активности, зачастую – в качестве предикторов, используемых в статистических моделях.

1.2 Радиолокационные характеристики грозовых облаков, характеристики при переходе в грозовую стадию

Важным направлением работ является определение параметров облаков, которые могут быть использованы в качестве предикторов при прогнозе ОЯ (в частности, радиолокационных параметров); параметров, используемых в качестве индикатора происходящей грозовой активности - как при анализе данных наблюдений, так и при численном моделировании (например, разработка параметризаций молниевой активности в глобальных численных моделях атмосферы и океана). В качестве таких параметров могут выступать характеристики неустойчивости атмосферы или другие характеристики облаков – содержание микрофизических фракций, скорость восходящих потоков, высота верхней границы и проч. Важным источником такой информации являются радиолокационные (и прочие геофизические) наблюдения.

При выполнении радиолокационных и прочих геофизических наблюдений приходится учитывать технические особенности используемых систем и алгоритмы обработки первичных данных, которые постоянно совершенствуются. Так, в работе [27] предложен алгоритм автоматического выделения башенковидных кучевых и кучево-дождевых облаков на основании порогового значения максимальной радиолокационной отражаемости (более 33 dBZ) и значения CAPE > 0 Дж/кг (по результатам численного моделирования). Эта и подобные работы имеют большую практическую значимость – они способствуют обеспечению безопасности полетов. Развивается использование современных статистических методов для более эффективного использования получаемых данных. Так, использование нейронных сетей, действующих разнородную пространственно-временную информацию, может существенно улучшить прогноз грозовой активности. Продемонстрировано для территории Китая [28], что прогноз молний улучшается с увеличением количества используемых в нейросети источников данных, превосходя результаты трех принятых схем прогноза, с которыми они сопоставлялись. Нейронные сети используются и выделения облаков по данным спутниковых наблюдений [29], что все еще остается достаточно сложной задачей, особенно при попытке различить облака над заснеженной или покрытой льдом подстилающей поверхностью.

Важной задачей является определение значений радиолокационных параметров при переходе облаков в грозовую стадию. Так, показано [30] что появлению грозовых разрядов предшествует положения уровня отражаемости 35 dBZ в зоне температур ниже -20°C . Значительные успехи в определении предикторов грозовой активности связаны с использованием поляризационных характеристик радиолокаторов. Так, в работе [31] показано, что присутствие переохлажденных дождевых капель и крупы в облаке, также как и колонны

дифференциальной отражаемости (Z_{dr}), является хорошим предиктором грозовой активности (с заблаговременностью 6-12 мин) на этапе развития облака. Показано, что использование колонны удельной дифференциальной фазы (K_{dp}), указывающей на наличие восходящих потоков, в комплексе с Z_{dr} для хорошо развитого облака, в котором присутствуют градины и крупа, также может быть полезным. В работе [32] также указывается на возможность использования колонны дифференциальной отражаемости и удельной дифференциальной фазы в качестве предикторов электрических разрядов. Аналогично, исследователи [33] приводят оценки связи внутриоблачных разрядов и удельная дифференциальной фазы. Показано, что последняя может использоваться в качестве идентификатора внутриоблачных разрядов, так как связана с вертикальной ориентацией ледяных кристаллов (в исследовании – в средней и верхней части облака) и демонстрирует хорошую корреляцию с электрической активностью на различных стадиях жизненного цикла облака.

Характеристики грозовых облаков и их значения при появлении первых электрически разрядов варьируются в зависимости от сезона, региона и местных особенностей. Таким образом, в преобладающем большинстве работ приводятся значения параметров атмосферы и облаков для конкретного географического региона и периода (или даже отдельного рассмотренного облака) [33–37]. Так, специальную триггерную функцию предлагается использовать в моделях для воспроизведения конвекции в прибрежных районах [38]. Ключевыми характеристиками облаков по данным радиолокационных наблюдений считаются высота распространения радиоэха (высота верхней границы) и максимальная радиолокационная отражаемость. Как правило, кучево-дождевые облака имеют максимальную высоту радиоэха не выше нижней границы тропопаузы, однако в случае развития особо мощных процессов (например, суперячейковых) может наблюдаться и проникающая конвекция. Так, исследования максимальной высоты распространения радиоэха в СССР на различных широтах показало, что 70% грозовых облаков имеют высоту верхней границы от 8 до 11 км, при этом ее значения варьируются от 2 до 18 км [39]. Статистическое исследование распространения радиоэха грозовых облаков на территории центральной части Уральского Прикамья [40] показало, что медиана его максимальной высоты составила 9,2 км. Обобщающее исследование грозовых облаков Северного Кавказа [41] указывает, что вертикальная протяженность таких облаков достаточно велика, они развиваются в области температур от $+10^{\circ}$ до -45°C (что приблизительно соответствует высоте 10 км). Суперячейковое облако, развивавшееся на Северном Кавказе (19 августа 2015 г.), имело максимальную высоту верхней границы 15-16 км, максимальную радиолокационную отражаемость 75 dBZ [42]. Радиолокационные исследования (с борта самолета) облаков глубокой конвекции в тропиках и субтропиках показали наличие

мощных восходящих движений во всей толще тропосферы, скорость восходящих потоков в ряде случаев превышала 30 м/с, а нисходящих – 19 м/с, при этом высота радиоэха достигала 18 км и была обнаружена статистическая связь скорость восходящего потока и высоты отражаемости 40 и 30 dBZ [43].

Особым образом характеризуются районы с муссонной циркуляцией, региональные особенности которых усиливаются в условиях меняющегося климата [44]. В таких регионах исследования, как правило, выполняются отдельно для каждой из фаз циркуляции: предмуссонной, муссонной (включая периоды усиления и ослабления муссона), постмуссонной. Так, спутниковые измерения характеристик облаков предмуссонного периода в бассейне Амазонки показали, что в условиях аэрозольного загрязнения развиваются более мощные облака, в которых в 2 раза больше содержание ледяных частиц и частота молний [45], а наибольшее увеличение мощности и молниевой активности отмечается при малых значениях энергии неустойчивости. В настоящей диссертационной работе рассматриваются, среди прочих, грозовые облака, развивающиеся в период Индийского муссона (глава 2), который характеризуется 80% годового количества осадков [46]. Исследование [47] показывает изменения роли различных механизмов в формировании муссонных условий, связываемых с изменениями климата, что подчеркивает актуальность работ этого направления. Высота верхней границы муссонных конвективных систем в 33-40% случаев составляет 7-15 км (в зависимости от способа ее определения) [48]. Облака муссонного периода характеризуются высотой распространения радиоэха от 2 до 14 км, а строение атмосферы в период муссонов более благоприятно для развития конвекции [49].

Надо отметить, что хотя различие характеристик грозовых облаков в разных регионах является общепризнанным и в классических работах [4,10] приводятся обобщения данных натурных наблюдений, современные сравнительные исследования региональных особенностей достаточно редки. В отличие от исследований характеристик неустойчивости атмосферы, статистические характеристики грозовых облаков приводятся, как правило, для отдельных географических районов. Это объясняется прежде всего использованием различного оборудования для выполнения измерений (с отличающимися техническими характеристиками), что существенно осложняет любое обобщение данных. Среди редких исключений можно назвать работы [50–53], где приводятся сравнительные оценки возникновения мезомасштабных конвективных систем над различными регионами, интенсивность молниевой активности в зависимости от микрофизического строения облаков (по спутниковым измерениям), сравнительная характеристика условий возникновения различных типов разрядов и проч.

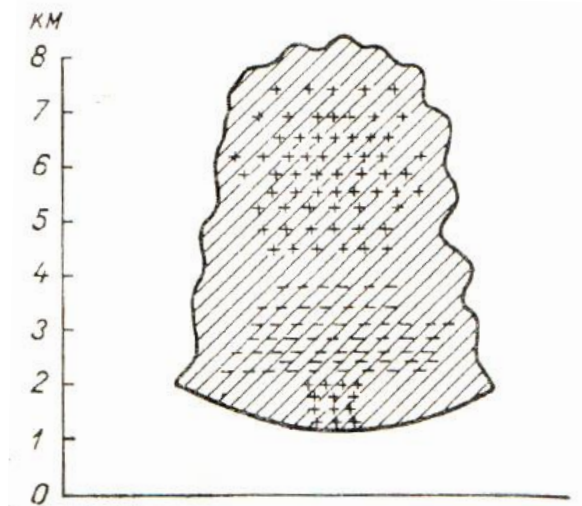
1.3 Электрическая структура и характеристики грозовых облаков

Электрическая структура облаков представлена в классических работах выдающихся исследователей XX века [10, 54–56]. Так, в соответствии с работой [57] в облаках повсеместно присутствует смесь разноименно заряженных гидрометеоров. При этом, однако, в различных областях существует преобладание частиц того или иного знака заряда. Это способствует формированию электрического поля в облаках. В силу большой динамичности процессов, это поле также меняется достаточно быстро. Важным является различие характеристик электрического поля и зарядов на различных стадиях развития (и этапах электризации) облака.

Электрическую структуру грозового облака ранее представляли как диполь, состоящий из нижнего слоя отрицательного объемного заряда и верхнего – положительного [10]. Позднее это представление было дополнено относительно небольшой областью положительного заряда в нижнем граничном слое (рис. 1.2) [54, 56]. Указанная структура считается обобщенной: в реальных облаках могут наблюдаться многочисленные «вторичные» области зарядов обоих знаков, полярность облака может меняться в ходе его развития, а статистические характеристики грозовых облаков различных физико-географических районов могут различаться [54]. Полагается, что именно наличие этого нижнего положительного заряда является необходимым для формирования молний (разрядов облако-земля), а критические значения градиента потенциала (напряженности электрического поля) достигается в облаке на границе центрального отрицательного и нижнего положительного заряда [54].

Приведенные выше представления остаются классической моделью электрической структуры облака. Однако измерения [58] показывают, что электрическая структура изолированного грозового облака может быть представлена 4 областями заряда: к упомянутым выше добавляется верхний отрицательный слой. При этом изменение с высотой напряженности электрического облака демонстрирует 3 экстремума. В суперячейках измерения вне сильных восходящих потоков имеют сложную электрическую структуру. Оценки, выполненные при помощи системы картографирования молний (LMA) также указывают на наличие дополнительных областей заряда, помимо основной трехполюсной структуры, а также неоднородность электрической структуры внутри облака [59, 60]. Отмечается различная активность областей заряда при разрядах разной полярности и разного типа [59, 61–63].

а)



б)

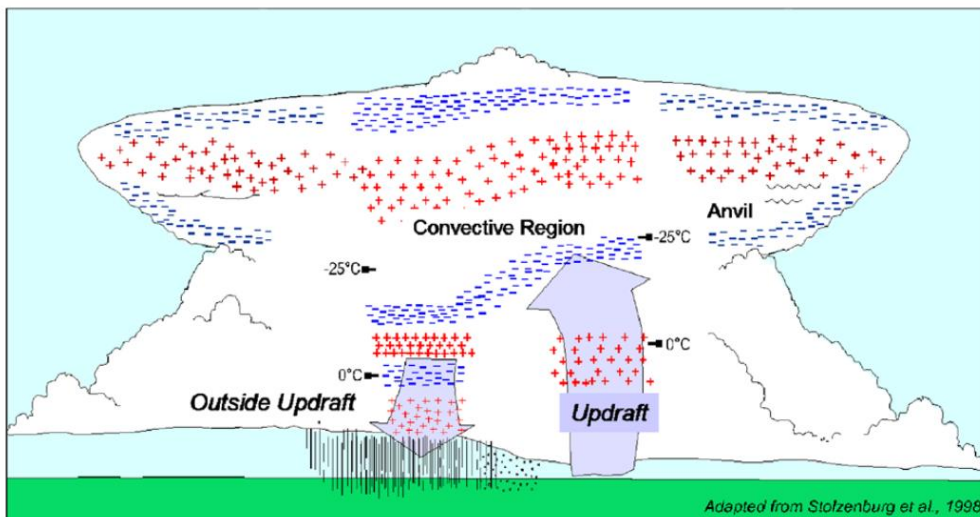


Рисунок 1.2 – а) Электрическая структура кучево-дождевого облака [54];
б) концептуальная модель изолированного грозового облака на стадии зрелости [60]

Большую роль в формировании представлений об электрических характеристиках кучево-дождевых и грозовых облаков сыграли многочисленные натурные исследования, в первую очередь – самолетные, радиозондовые, ракетные. Среди них нужно отметить отечественные работы [64, 65–67].

Из числа наиболее широко используемых систем геофизического контроля электрических полей атмосферы можно выделить приземные измерения напряженности электрического поля. Известно, что при прохождении кучево-дождевых облаков возникают искажения приземного электрического поля, вызываемые объемными зарядами в облаках [54]. Такие измерения могут использоваться совместно с данными сетей мониторинга грозовой активности (дополняя их) или самостоятельно, в том числе – для восстановления электрической структуры облаков.

Так, в работе [68] в результате измерений приземных значений градиента потенциала электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков отмечаются флуктуации осредненных за 5-минутный интервал значений до 1000 В/м (как в сторону положительных, так и в сторону отрицательных значений). При помощи двумерной модели оценены значения заряда при прохождении изолированного кучево-дождевого облака – они составляют от 0,20 до –0,22 мКл. Наблюдения за электрическими характеристиками в Якутске [69] показали, что при прохождении гроз над пунктом наблюдения вблизи подстилающей поверхности наблюдаются флуктуации напряженности электрического поля амплитудой более 20 кВ/м, продолжительность таких флуктуаций составляла до 2 часов. Статистические оценки [70], выполненные для большой выборки данных по результатам измерений приземной напряженности электрического поля в Главной геофизической обсерватории им. Воейкова показывают, что грозам соответствует наибольшие значения стандартного отклонения средней относительной флуктуации – по сравнению с целым рядом прочих метеорологических явлений, включающих различные виды осадков, метели, туманы и проч. Исследование пространственного распределения положительных грозовых разрядов на востоке Сибири [71] показало, что можно выделить основные центры грозовой активности. Причем в них может сильно различаться отношение положительных и отрицательных разрядов, что, в свою очередь, должно указывать на различную электрическую структуру облаков и влияние географических условий на формирование этой структуры. В работе [72] по данным непрерывных измерений флюксметрами вблизи поверхности земли для 7-летнего периода в трех пунктах на территории Нижегородской области получено, что осредненная величина напряженности грозового поля во время грозовых событий достигает значений порядка 10 кВ/м (обоих знаков). В результате фильтрации и разделения результатов измерений на компоненты, связанные непосредственно с разрядами и регулярные компоненты, показано, что возмущения напряженности электрического поля в окрестностях грозовых облаков имеют знакопеременный характер, из чего следует, что анализ усредненных данных недостаточно точно описывает происходящие процессы. Исследование [73] продемонстрировало, что при прохождении кучево-дождевых облаков летом, наблюдающиеся «медленные» вариации градиента потенциала по абсолютной величине и количеству структурных элементов значительно превосходят аналогичные флуктуации зимой. При этом средние значения градиента потенциала за теплое полугодие несколько меньше, чем за холодное, а среднеквадратическое отклонение градиента потенциала, наоборот, в 1,8 раз больше.

Основным источником информации об электрической активности грозовых облаков являются системы (сети) мониторинга грозовой активности (международные, национальные),

фиксирующие электромагнитные сигналы и определяющие характеристики разрядов, а также грозорегистраторы. Примерами таких сетей являются WWLLN (World Wide Lightning Location Network), GLD360 (Global Lightning Dataset), LMA (Lightning Mapping Array), системы регистрации гроз Росгидромета («Алвес», сеть ФГБУ «ВГИ» и НИЦ «Планета») и многие другие. Выполняются исследования, посвященные созданию новых сетей в Российской Федерации [74, 75] с целью увеличить достоверность и точность получаемых данных. Наряду с наземными наблюдениями данные о молниевой активности поступают от спутниковых систем, таких как TRMM Lightning Imaging Sensor (LIS) [76], GLM (Geostationary Lightning Mapper) и др.

Надо отметить, что до сих пор нет единства мнений по поводу физических механизмов, приводящих к формированию грозовых разрядов [77]. Большое количество сведений об электрической структуре облаков, ее эволюции и физических процессах, ее сопровождающих, получено по результатам численного моделирования. Численное моделирование имеет ряд преимуществ перед данным наблюдений, как-то: модели воспроизводят характеристики, наблюдения за которыми не выполняются (или связаны со значительными сложностями), параметры облаков можно получать с достаточно малым пространственным и временным шагом, есть возможность варьировать учитываемые процессы и начальные условия.

Развивается подход явного моделирования электрических процессов [78]. Однако в моделях прогноза погоды и климата учет процессов электризации зачастую параметризован. В качестве предикторов (показателей) грозовой активности используются различные параметры атмосферы (в частности, параметры неустойчивости, такие как CAPE) и характеристики облаков (высота верхней границы, содержание ледяных частиц и проч.) [14, 17, 24, 26, 31, 79, 80, 81, 82, 83].

Так, по данным реанализа показано, что хорошим идентификатором молниевой активности является произведение CAPE на интенсивность осадков в точке. Таким образом успешно воспроизводится суточный ход и глобальное распределение плотности молниевых разрядов [80]. Разработана параметризация молниевой активности для глобальных моделей с учетом содержания ядер конденсации [79]. Показано, что пространственная плотность разрядов увеличивается с увеличением нормированной доступной конвективной энергии (NCAPE), содержания аэрозолей (CCN) и вертикальной мощности «теплой» части облаков (ниже нулевой изотермы) – эти параметры имеют наибольший вес в построенной модели множественной регрессии. По результатам численного моделирования [84] продемонстрировано, что наилучшим показателем молниевой активности является интегральная масса крупы (как пространственного распределения областей грозовой активности, так и положения пиковых

значений частоты разрядов). Рассмотренные наряду с массой крупы параметры – объем области со скоростью восходящего потока более 10 м/с, потоки ледяных частиц, максимальная скорость восходящего потока – показали не такие хорошие результаты по данным исследования. Важную роль крупы при рассмотрении электрических процессов в облаках демонстрирует и исследованное глобальное распределение молниевой активности с учетом сезонной и суточной изменчивости при помощи глобальной конвективно-разрешающей модели с параметризацией, основанной на восходящих потоках ледяных частиц и присутствии крупы в облаке [81]. Полученные результаты показывают хорошее соответствие с данными наблюдений.

Особое место в исследованиях грозовых процессов занимают модели конвективных облаков – различных классов и размерности. По-прежнему сохраняют свою значимость модели малых размеров – двумерные [85]. Большую актуальность имеют трехмерные модели облачной конвекции [86, 87]. Работы с использованием численных моделей посвящены разнообразным аспектам электризации облаков и их развития: исследованиям коронных разрядов [88], влиянию атмосферного аэрозоля на развитие грозовых облаков [85], формированию электрической структуры облака [87], слиянию конвективных ячеек и проч. Так, при помощи LES-модели (моделирование крупномасштабных вихрей) оценивается турбулентность, связанная с грозовыми облаками [89] и представляющая значительную опасность для движения воздушных судов. При помощи двумерной модели получены характеристики токов коронных разрядов [90]. Представлены результаты расчета электрических характеристик грозового облака [91], эволюции его макроструктурных и микрофизических параметров при помощи трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака [92]. Исследованы процессы электризации по результатам трехмерного моделирования, показано формирование трехполюсной электрической структуры грозового облака с достаточно мощным нижним положительным зарядом [93].

Таким образом, обзор современного состояния исследований характеристик грозовых облаков различных регионов показывает в первую очередь большое количество и разнообразие используемых средств измерений и методов обработки информации. Все более значимую роль приобретают разнообразные численные физические и статистические модели, позволяющие обобщать данные, полученные из различных источников. Разрабатываемые модели и методы в большом количестве случаев демонстрируют региональные особенности, что выводит на первый план задачу исследования и обобщения особенностей протекания грозовых процессов и характеристик грозовых облаков в различных районах нашей планеты.

1.4 Выводы к главе 1

1. Исследование гидродинамических, микрофизических и электрических характеристик грозовых облаков на разных стадиях их эволюции, в том числе перед началом электрических разрядов и при их регистрации, имеет фундаментальное значение для понимания физических процессов, приводящих к электризации кучево-дождевых облаков и грозовой деятельности.

2. Комплексные исследования атмосферы, опирающиеся на данные различных измерений и численного моделирования, позволяют получать наиболее полные и обоснованные сведения о рассматриваемых процессах.

3. Большое значение приобретают сравнительные исследования, дающие оценки изученных региональных различий электризации облаков и их характеристик.

4. Численные модели являются одним из наиболее удобных инструментов исследования процессов, приводящих к электризации кучево-дождевых облаков в силу того, что позволяют получать данные, недоступные для измерения, а также значения параметров с достаточно малым пространственным и временным шагом, варьировать начальные условия. Наиболее обоснованным является применение моделей в комплексе с данными натурных наблюдений.

Глава 2. Исследования грозных облаков с использованием данных радиолокационных и систем регистрации грозных разрядов в различных регионах России и в Индии

2.1 Методика исследования и данные

В Главе 2 приведены результаты статистических исследований облаков (их радиолокационных и электрических параметров) в Индии (для разных штатов, сезонов, типов разрядов), исследований изменения характеристик облаков при переходе в грозную стадию (Индия, Северный Кавказ, Северо-Запад РФ), а также оценки линейных связей частоты разрядов и радиолокационных параметров облаков.

При подготовке текста Главы 2 использованы тексты и материалы статей, опубликованных при участии соискателя:

– 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 грозную стадию. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. №12 (383). С. 932-936. doi: 10.15372/AOO20201205. [*Переводная версия*] Sin'kevich A.A., Popov V.B., Abshaev A.M., Boe B., Pawar S.D., Mikhailovskii Yu.P., Gopalakrishnan V., Gekkieva Zh. Radar characteristics of convective clouds during transition to the cumulonimbus stage in different regions of the world. Vol. 34. No. 2. Pp. 134-139. doi: 10.1134/S1024856021020081.

– Синькевич А.А., Торопова М.Л., Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Павар С., Гопалакришнан В. Особенности взаимосвязей электрических и радиолокационных параметров грозных облаков в Индии (натурные исследования). // Метеорология и гидрология. 2021. №6. С. 99-106. [*Переводная версия*] Sin'kevich A.A., Toropova M.L., Mikhailovskii Yu.P., Popov V.B., Pawar S., Gopalakrishnan V. Features of the Relationship between Electrical and Radar Parameters of Thunderclouds in India (Field Studies). // Russian Meteorology and Hydrology. 2021. Vol. 46(6). Pp. 410-415. Doi: 10.3103/S106837392106008X

– Торопова М. Л., Синькевич А. А., Павар С., Гопалакришнан В., Михайловский Ю. П. Характеристики грозных облаков муссонного и постмуссонного периодов в Индии // Метеорология и гидрология. – 2022. - № 8. – с. 68-79. [*Переводная версия*] Toropova, M.L., Sin'kevich, A.A., Pawar, S. et al. Characteristics of Thunderstorms during the Monsoon and Post-monsoon Seasons in India. Russ. Meteorol. Hydrol. 47, 620–628 (2022). <https://doi.org/10.3103/S1068373922080088>.

Для исследования радиолокационных характеристик грозных (и переходящих в грозную стадию) облаков северо-запада России использовались данные метеорологического

радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в пос. Воейково Ленинградской области (в 10-ти км от Санкт-Петербурга). Период обзора радиолокатора составляет 10 мин. Применялась программа вторичной обработки радиолокационной информации «ГИМЕТ-2010». С помощью данных сети регистрации грозных разрядов Blitzortung (URL: <https://www.blitzortung.org>; дата обращения – 18.01.2026) для периода с мая по сентябрь 2017 – 2018 гг. было отобрано около 60 облаков, переходящих в грозовую стадию. В ходе анализа исследованы их характеристики за 10 мин до начала разрядов (т.е. во время обзора, предшествующего началу грозовой активности ячейки) и во время обзора, соответствующего первому зарегистрированному разряду. Некоторые технические характеристики используемого оборудования, а также информация о регионах и исследуемом периоде приведена в таблице 2.1.

Выборка аналогичного размера использовалась для исследования характеристик облаков на Северном Кавказе. Применялись данные радиолокатора МРЛ-5, установленного вблизи Ставрополя. Для выделения грозных ячеек применялись данные системы местоопределения грозных разрядов LS8000.

Во всех исследуемых регионах использовались осредненные по пространству радиолокационные данные с разрешением 1 км.

Данные натуральных наблюдений в Индии получены для двух регионов: штата Карнатака (2019 г.) и штата Махараштра, (2015 г.) – рис.1, выделены муссонный и постмуссонный периоды. После анализа было выполнено сравнение с радиолокационными характеристиками облаков Северного Кавказа и северо-запада России.

Как для штата Махараштра, так и для штата Карнатака использовались данные наблюдений метеорологических радиолокаторов WR-100. Рабочая длина волны радиолокатора – 5,4 см, время обзора составляет 7,5 мин. Вторичная обработка данных радиолокационных измерений выполнялась с использованием программного пакета TITAN [94]. Данные об электрических разрядах получены при помощи сети грозорегистраторов Maharashtra Lightning Location Network (MLLN). Сеть действует на базе Института тропической метеорологии Индии (Indian Institute of Tropical Meteorology - ИТМ). Она включает в себя 18 широкополосных датчиков, работающих на частотах от 1 Гц до 12 МГц и достаточно подробно описана в работе [95].

Частота разрядов определялась следующим образом. Была выполнена работа, которая позволила сопоставить координаты облаков с координатами разрядов – для каждого обзора радиолокатора. Для каждого из облаков было получено количество разрядов за время радиолокационного обзора ($N / 3,5$ мин), которая впоследствии была пересчитана в частоту разрядов (мин^{-1}). Был выполнен отбор облаков – с целью уменьшения влияния погрешностей

радиолокационных измерений, которые зависят, среди прочего, от удаленности наблюдаемого объекта от радиолокатора. Для этого в рассматриваемую выборку были включены только грозовые облака, наблюдаемые на расстоянии от 30 до 120 км от радиолокатора. Под облаками (ячейками) здесь и далее понимаются одноячейковые конвективные облака. При рассмотрении многоячейковых облаков в тексте дано соответствующее пояснение.

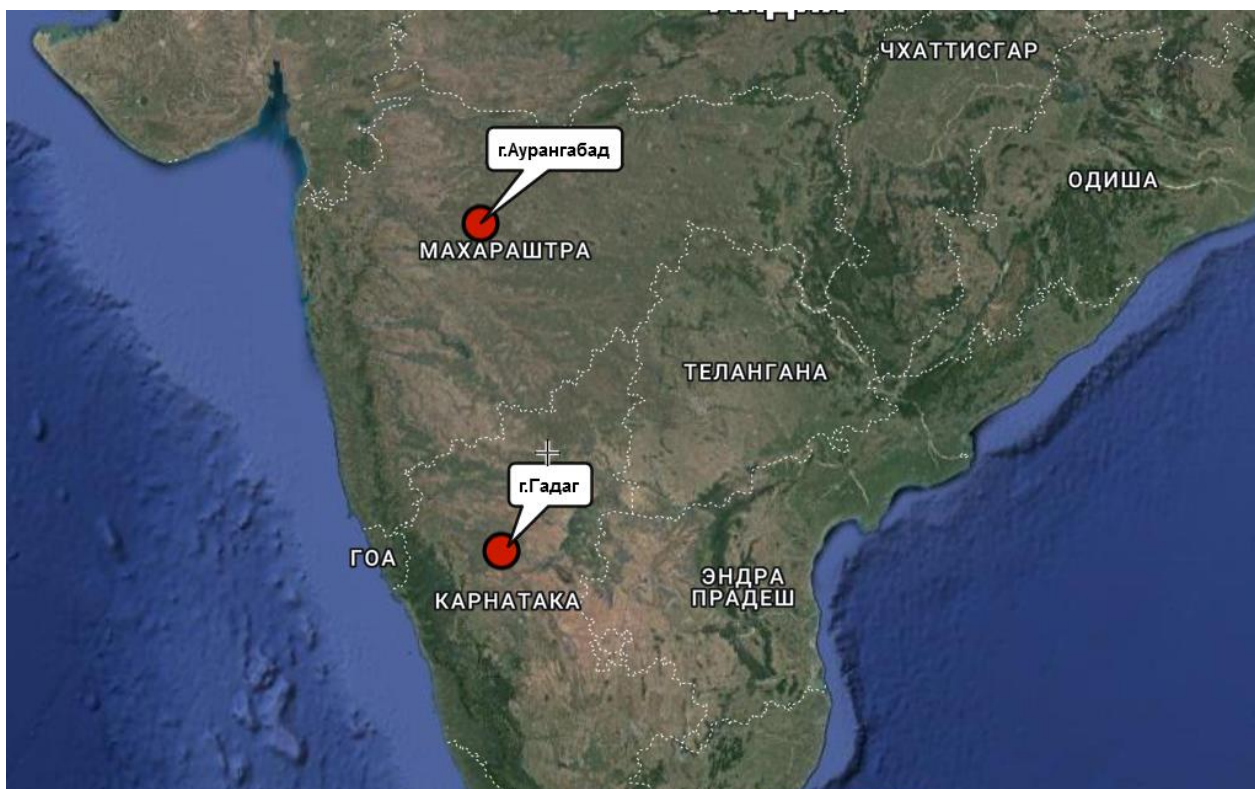


Рисунок 3.1 - Регион исследования: п-ов Индостан, г. Аурангабад (штат Махараштра) и г. Гадаг (штат Карнатака) (Индия)

Исследование 2015 года содержит данные о 29 грозовых ячейках на разных стадиях эволюции, развивавшиеся 4 октября 2015 г., с 7:08 до 10:02 (UTC+5:30). Выбранный день может быть отнесен к периоду ослабления муссона.

Исследование 2019 года – с 1 августа по 01 октября 2019 года – включало период действия Индийского муссона (август – середина сентября) и постмуссонный период (середина сентября – начало октября). Облака были классифицированы в зависимости от сезона по направлению движения облачной ячейки: западная составляющая направления движения ячейки соответствует муссонному периоду, восточная – постмуссонному. В рассматриваемый период было зафиксировано более 2500 грозовых облаков и более 5000 связанных с ними электрических разрядов. В работе приведены результаты анализа, выполненного для различных выборок облаков в Индии:

– Для определения статистических характеристик грозовых облаков проанализирована выборка, включающая 68 грозовых облаков муссонного и 1194 – постмуссонного периода, где рассматривались облака с различными типами разрядов: «облако-земля» (О-З), а также внутриоблачные и «облако-облако» (О-О).

– Для анализа сезонных особенностей перехода в грозовую стадию облаков тропических широт указанная выборка была дополнена для муссонного периода и сокращена для постмуссонного (облака выбирались случайным образом). В итоговую выборку было включено 100 грозовых облаков муссонного периода и 101 – постмуссонного, для всех рассматриваемых типов разрядов («облако-земля», «облако-облако» и внутриоблачных).

– Для сравнения характеристик облаков различных регионов при переходе в грозовую стадию была сформирована выборка из 60 облаков (для каждого облака приведены значения параметров перед началом разрядов и во время регистрации первой молнии) – для лучшего соответствия размерам выборок других регионов, которые также включали 60 облаков.

По результатам анализа приведенных выше данных получены характеристики грозовых облаков в Индии для различных типов циркуляции: муссонного и постмуссонного. Выборки для двух периодов исследования рассматривались отдельно.

Таблица 2.1 – Регионы исследования и характеристика используемых измерительных систем

Регион исследования	п. Воейково, Лен. область, Россия	Ставрополь, Россия	г. Гадаг, штат Карнатака, Индия	г. Аурангабад, штат Махараштра, Индия
Координаты радиолокатора	59°57' с. ш. 30°42' в. д.	45°06' с.ш. 42°06' в.д.	15,42° с. ш. 75,63° в. д.	19°52' с. ш. 75°19' в. д
Период исследования	май – сентябрь 2017 – 2018 гг.	май – сентябрь 2010 – 2018 гг.	01 августа – 1 октября 2019 г.	04 октября 2015 г.
Радиолокатор	ДМРЛ-С	МРЛ-5, II канал	WR-100	WR-100
Длина волны радиолокатора	5,3 см	10 см	5,4 см	5,4 см
Период обзора радиолокатора	10 мин	3,5 мин	3,5 мин	7,5 мин
Система местоопределения грозовых разрядов	Blitzortung	LS8000	Maharashtra LLN	Maharashtra LLN

2.2 Характеристики грозовых облаков в Индии (штат Махараштра)

При подготовке текста настоящего раздела использовались материалы, опубликованные в статье [96], где соискатель полностью выполнил обработку радиолокационных данных и данных системы регистрации гроз и их статистический анализ.

Были рассмотрены 29 грозовых ячеек на разных стадиях развития. Их статистические характеристики приведены в таблице 2.2, в Приложении А приведены гистограммы распределений рассматриваемых радиолокационных и электрических параметров облаков.

Наибольшая высота уровня отражаемости 30 дБZ (H_{30}) изменялась от 6,9 до 16,6 км. При этом почти для половины облаков (48%) H_{30} находилась в пределах 9 - 10 км, для 28% – в пределах 10 - 13 км. Верхняя граница облаков по уровню отражаемости 5 дБZ (H_5) составила 14 – 16 км при медианном значении 14 км. Максимальная интенсивность осадков I_{\max} изменялась от 6 до 18 мм/ч; для более, чем половины рассмотренных грозовых ячеек (55%) она составила менее 13 мм/ч. Поток осадков сильно варьировался: в среднем его значение составило 299 м³/с, при минимальной величине 38 м³/с и максимальной – 643 м³/с. Распределение потока осадков показало, что 48% ячеек имели поток осадков менее 300 м³/с, а 90% - менее 500 м³/с.

Максимальная радиолокационная отражаемость грозовых облаков Z_{\max} варьировалась от 41 до 55 дБZ (рис. 2.2). Медиана составила 49,5 дБZ. На рис. 2.2а приведено распределение значений Z_{\max} . Показано, что 80% грозовых ячеек имели Z_{\max} менее 52 дБZ. Такие результаты соответствуют другим исследованиям [97–100], показавшим, что регистрация разрядов «облако-земля» происходит при отражаемости более 40 дБZ, что приблизительно соответствует высоте изотермы -10°C . На результаты измерений могут оказывать влияние следующие технические характеристики аппаратуры, которые различаются для исследуемых регионов, а именно – взаимное расположение облака и регистрирующего прибора, вид разряда и величина токов, а также другие факторы. Так, в исследовании, проведенном в Северо-Кавказском регионе, первые молнии в коротковолновом диапазоне фиксировались системой LS8000 при Z_{\max} равной 29 дБZ, в длинноволновом диапазоне - при 42 дБZ [101].

Высота расположения уровня максимальной радиолокационной отражаемости $H_{Z_{\max}}$ варьируется от 2 до 7,3 км. При этом медианное значение составляет 4,3 км. Т.к. в среднем изотерма 0°C располагается на высоте около 5-ти км, то можно заключить, что около 70% рассмотренных грозовых облаков имеют высоту $H_{Z_{\max}}$ ниже изотермы 0°C .

Распределение вертикально интегрированной водности VII демонстрирует значения от 3,6 до 26,1 кг/м². Медианное значение – 12,5 кг/м². Оценивался безразмерный радиолокационный критерий грозоопасности Y , определяемый по формуле:

$$Y = H_5 * \lg(Z_3) \quad (1)$$

где Z_3 – высота изотермы -22°C .

Критерий Y варьировался от 15,1 до 27,3. 50% рассматриваемых грозовых облаков имели значения Y менее 22,7.

Одним из наиболее показательных радиолокационных параметров грозовых облаков, наряду с максимальной отражаемостью, является объем переохлажденной части облака выше изотермы 0°C с отражаемостью более 35 дБZ – dV_{35} . dV_{35} изменялся от 22 до 294 км³. Были рассмотрены аналогичные объемы с порогом отражаемости 40 и 50 дБZ – dV_{40} и dV_{50} , соответственно. dV_{40} варьировался от 22 до 70 км³, в то время как dV_{50} изменялся от 0 до 22 км³.

Электрические характеристики облаков включали число разрядов и их частоту f (мин⁻¹). С рассматриваемыми грозовыми ячейками были связаны 105 разрядов. Из них 69 относились к типу «облако-облако» (О-О) и 36 – «облако-земля» (О-З). Такое распределение разрядов не сильно отличается от среднестатистического, согласно которому на долю О-З приходится около 25% [102]. С каждой ячейкой было связано от 1 до 11 разрядов, их частота составила, соответственно, 0,1 – 1,5 мин⁻¹. Преобладающее большинство грозовых облаков (83%) имели f менее 1,0 мин⁻¹ (рис. 2.2).

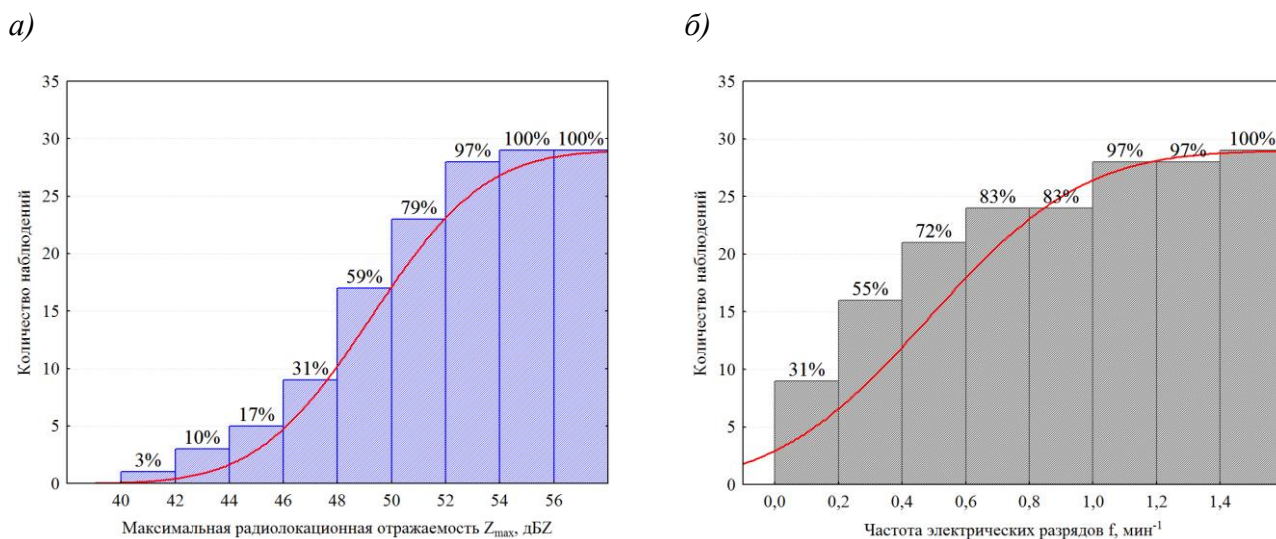


Рисунок 2.2 – Кумулятивные распределения значений максимальной радиолокационной отражаемости (а) и частоты электрических разрядов (б) исследуемых грозовых облаков (4 октября 2015 года, штат Махараштра, Индия)

Интерес представляет частота разрядов, нормированная на объем переохлажденной части облака $dV_{35} - f/dV_{35}$. Этот показатель позволяет определить, какой объем dV_{35} необходим

для формирования 1 электрического разряда. Для рассмотренных облаков минимум f/dV_{35} составил 0,001, т.е. 1 разряд соответствует 1000 км³ объема dV_{35} . Максимальное значение равнялось 0,021, т.е. 1 разряд соответствует 50 км³ объема dV_{35} . При этом медиана оказалась равной 0,004, т.е. 1 разряд соответствует 250 км³ объема dV_{35} .

Всего в рассматриваемый день в исследуемом районе было зарегистрировано 3716 разрядов (в период с 07:00 до 16:36). Из них 35% (1297 разрядов) пришлось на долю О-З и 65% (2421 разряд) – на долю О-О. Доля разрядов, с которыми связаны положительные токи молний (I+), – 47%, отрицательные (I-) – 53%. Это почти равное в общем случае распределение меняется при рассмотрении различных типов разрядов. В случае О-З положительные токи связаны с 7% разрядов, отрицательные – с 93%. Для О-О доля положительных токов составляет 69%, отрицательных – 31%.

В рассматриваемом поле облаков с О-З были связаны только отрицательные токи, медиана составила 17 кА. С О-О были связаны как отрицательные токи (медиана – 9,4 кА), так и положительные (медиана – 6,7 кА).

На рисунке 2.3б приведены диаграммы размаха распределений силы тока, связанной с разрядами. Показано, что с разрядами О-З связаны наибольшие по величине токи: медиана I+ и I- составляет 36,3 и 24,6 кА. Для О-О медианы I+ и I- равняются 7,3 и 8,1 кА соответственно.

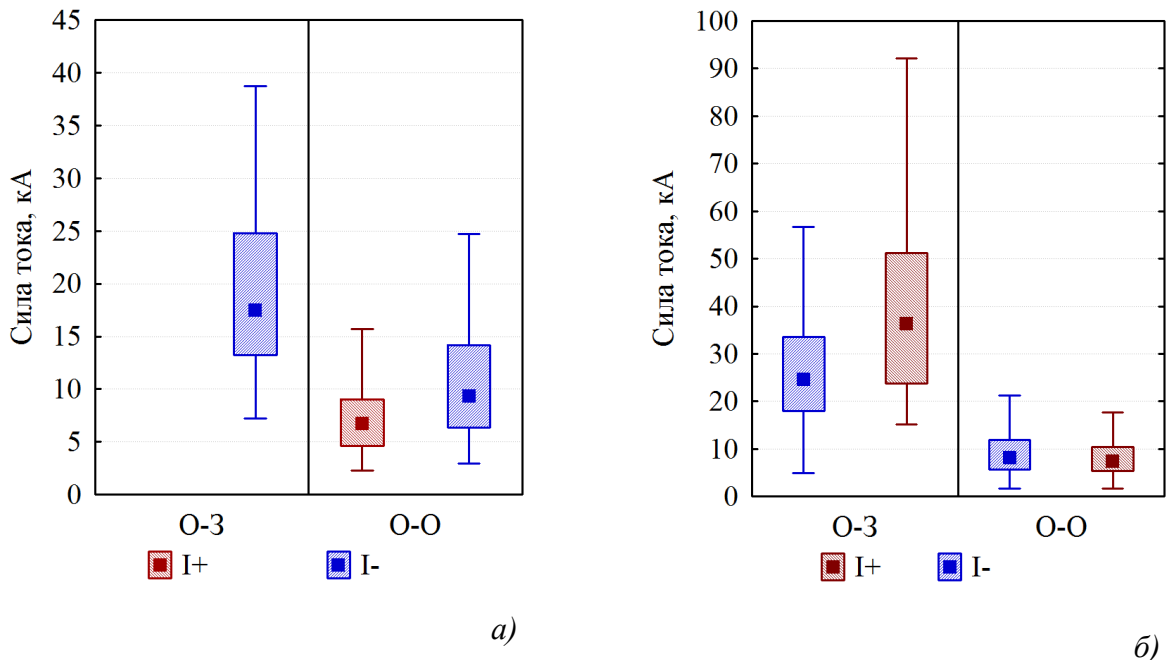


Рисунок 2.3 – Сила тока зарегистрированных разрядов облако-земля (О-З) и облако-облако и внутриоблачных (О-О): а) разрядов, связанных с рассматриваемыми грозовыми ячейками, б) всех разрядов в рассматриваемый период. Маркерами обозначены медианы распределений

Таблица 2.2 – Статистические характеристики радиолокационных параметров грозových ячеек (4 октября 2015 года, штат Махараштра, Индия)

Статистические характеристики / Радиолокационные параметры	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Ст. откл.
H_{30} , км	10,7	9,9	6,9	16,6	2,26
I_{\max} (мм/ч)	12,5	12,7	6,1	18,1	3,31
F (м ³ /с)	299,7	300,9	38,0	643,2	165,97
VIL , кг/м ²	12,7	12,5	3,6	26,1	5,07
Z_{\max} , дБZ	49,2	49,5	41,0	55,0	3,29
$H_{Z_{\max}}$, км	4,6	4,3	2,0	7,3	1,21
V_{35} , км ³	112,7	93,8	22,5	294,0	81,08
V_{40} , км ³	52,9	54,9	21,5	70,7	11,34
V_{50} , км ³	4,9	3,2	0,0	21,7	6,32
Радиолокационный критерий грозоопасности Y	22,4	22,7	15,1	27,3	3,57
f , мин ⁻¹	0,5	0,4	0,1	1,5	0,38

2.3 Развитие многоячейкового грозового облака в Индии (штат Махараштра)

Было рассмотрено развитие мощного многоячейкового грозового облака, сформировавшегося в поле облаков, описанном в разделе 2.2. Облако наблюдалось по данным радиолокатора с 6:53 до 9:24 (UTC+5:30). В ходе развития облака 4 раза происходило слияние входящих в его состав конвективных ячеек (07:46, 08:01, 08:24, 08:39). Радиолокационные изображения вертикального сечения исследуемого облака в моменты времени после слияния ячеек, приведены в Приложении Б.

Наибольшая высота уровня отражаемости 30 дБZ (H_{30}) в момент начала наблюдений составляла 9,1 км, достигнув наибольшего значения 12,1 км в 08:24 (рис. 2.4). Начиная с 08:46 облако перешло в стадию стационарирования и диссипации, во время которой не было зарегистрировано слияния ячеек. H_{30} на стадии диссипации достаточно быстро уменьшилась с 9,1 км до 6,1 км. Изменение во времени основных радиолокационных и электрических параметров рассматриваемого многоячейкового облака приведены на рисунках 2.4 и 2.5.

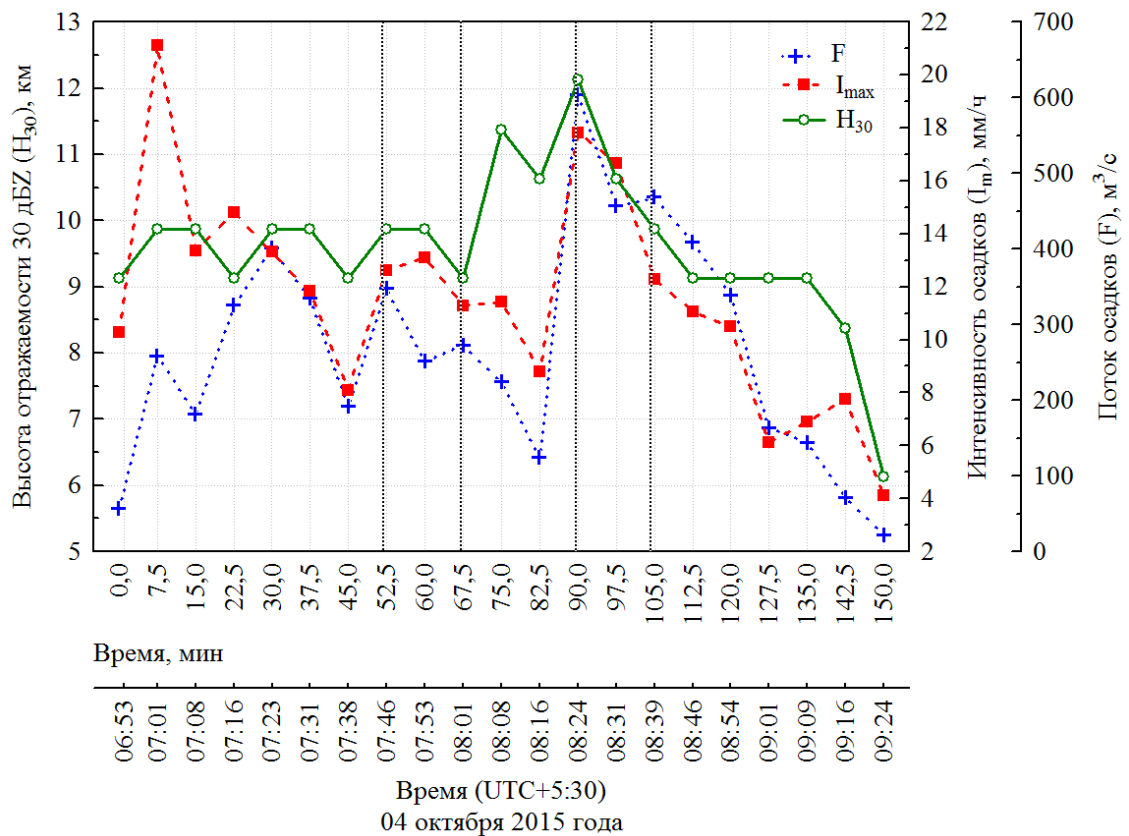


Рисунок 2.4 – Временной ход радиолокационных параметров многоячейкового грозового облака: высоты отражаемости 30 дБZ (H_{30}), максимальной интенсивности осадков (I_{max}), потока осадков (F). Вертикальными линиями отмечено время слияния ячеек.

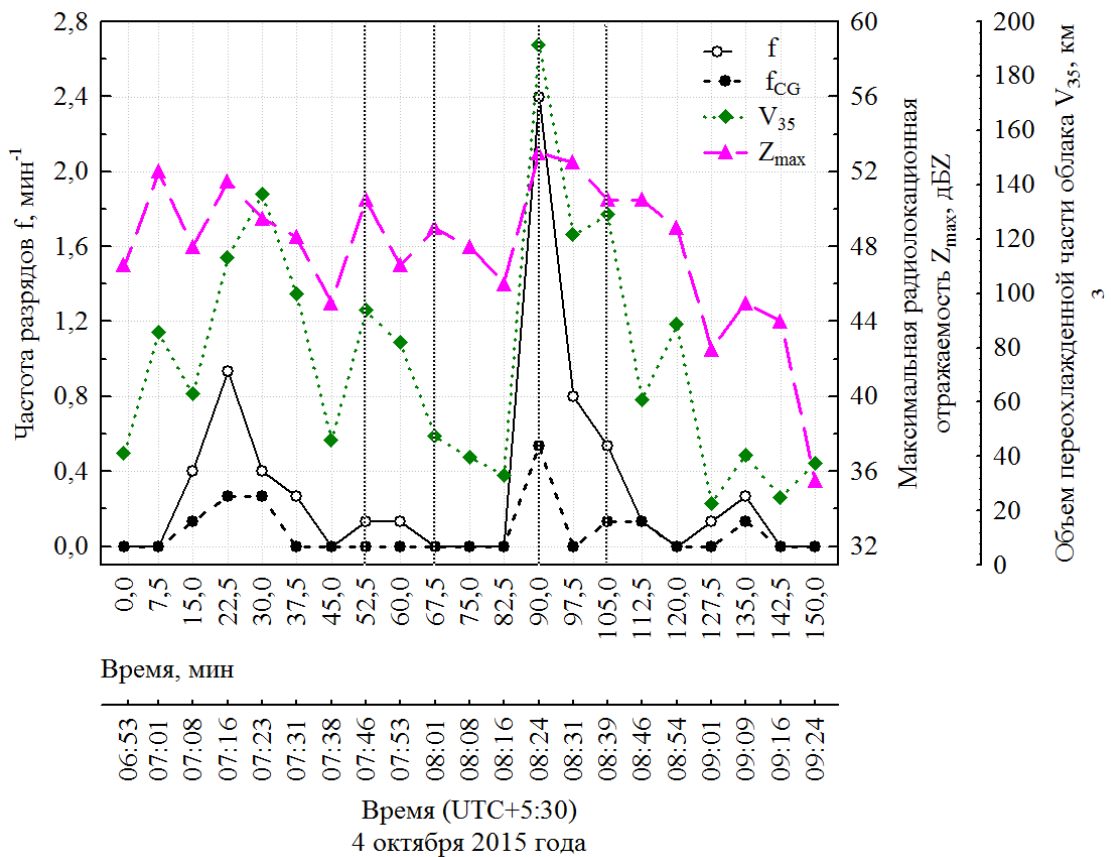


Рисунок 2.5 – Временной ход радиолокационных и электрических параметров многоячейкового грозового облака: частоты электрических всех разрядов (f) и О-З (f_{CG}), максимальной радиолокационной отражаемости (Z_{max}), объема переохлажденной части облака выше изотермы 0°C , с отражаемостью, превышающей порог 35 дБZ (V_{35}). Вертикальными линиями отмечено время слияния ячеек

С момента начала наблюдений за облаком, регистрировались выпадающие из него осадки. Наибольшая их интенсивность составила 21,1 мм/ч вскоре после начала наблюдений за облаком (отделения ячейки от родительского облака). Зафиксирован локальный максимум – 17,8 мм/ч (08:24). В это же время наблюдалось максимальное значение потока осадков из облака – $603 \text{ м}^3/\text{с}$. Также этому моменту времени соответствует наибольшая зафиксированная радиолокационная отражаемость, которая составила 53 дБZ.

Начало молниевой активности в рассматриваемом облаке произошло на 8-й мин наблюдений. Наибольшая частота разрядов составила $2,4 \text{ мин}^{-1}$ и по времени совпала с максимумом осадков и радиолокационной отражаемости. На рисунке 2.5 приведен временной ход суммарной частоты разрядов f и частоты разрядов О-З (f_{CG}), с которыми связывают наибольшие значения электрических токов. Число зарегистрированных разрядов О-З составляет

чуть менее половины всех зарегистрированных разрядов (43%, 21 разряд из 49). f_{CG} отлична от нуля для 7-ми обзоров радиолокатора из 21 рассмотренных. f больше нуля во время 12-ти обзоров радиолокатора. Наибольшая частота О-З наблюдалась в момент максимального развития облака (08:24).

Нормированная частота разрядов f/V_{35} достигла наибольшего значения 0,013 также в момент максимального развития, ее значение говорит о том, что для формирования одного разряда в минуту понадобилось 77 км^3 переохлажденной части облака.

Таким образом, наибольшая электрическая активность рассматриваемого многоячейкового облака наблюдается в момент его максимального развития, незадолго до перехода в стадию диссипации. Момент максимального развития облака выделяется во временном ходе радиолокационных параметров облака максимумом почти всех рассмотренных величин: высоты уровня отражаемости 30 дБZ, потока осадков, максимальной радиолокационной отражаемости, объема переохлажденной части облака V_{35} . Аналогичные результаты были получены ранее при рассмотрении развития мощного грозового облака в Северо-Кавказском регионе России [103]. В случае рассмотренного облака в Индии, максимуму предшествует слияние ячеек, что, по всей видимости, отразилось на характеристиках облака.

2.4 Характеристики грозовых облаков в Индии муссонного и постмуссонного периода (штат Карнатака)

В настоящем разделе приводятся результаты исследования радиолокационных параметров грозовых (и переходящих в грозовую стадию) облаков в штате Карнатака (Индия) муссонного и постмуссонного периода, а также электрических характеристик облаков. Параметры рассматриваются отдельно для облаков, в которых регистрировались разряды различных типов: облако-земля (О-З) и облако-облаков (О-О).

Характеристики облаков отличаются для муссонного и постмуссонного периодов. Статистические данные для некоторых рассмотренных параметров приведены в табл. 2.3.

Высота верхней границы грозовых облаков по уровню отражаемости 30 dBZ (ВГО) изменяется от 6,1 км (муссон/постмуссон, О-З/О-О) до максимального значения 17,4 км (постмуссон, О-З/О-О). Медианные значения в муссонных облаках (8,8/8,4 км для О-З/О-О соответственно) ниже, чем в постмуссонных (9,9/10,3 км).

Максимальная радиолокационная отражаемость Z_{max} (медиана) имела наименьшее значение в муссонных облаках с разрядами О-З (40,5 dBZ), а наибольшее – в облаках постмуссонного периода (46,0 dBZ для всех типов разрядов) (рис. 2.6). Максимальное зарегистрированное значение относилось также к постмуссонному периоду (58,0 dBZ, О-О), а минимальное – к муссонному (51,5 dBZ).

Значения приведенной водности WIL также оказывается наибольшим в облаках постмуссонного периода. Она составляет 3,8/4,3 кг/м² (О-З/О-О) в муссон и 7,5/8,1 кг/м² при его ослаблении. В постмуссонных облаках ее значения достигают 45 кг/м² (О-З и О-О), в муссонных – не превышают 16 кг/м².

Постмуссонные облака характеризуются значительно большими значениями переохлажденных объемов $dV35$ и вертикальной мощности переохлажденного слоя $dH35$ (рис. 2.6). Так, для разрядов О-З медиана $dV35$ составила 24/106 км³ (муссон/постмуссон соответственно). Аналогичные значения для О-О были равны 31/116 км³. Для части облаков $dV35$ был равен 0 км³. При этом в муссонный период доля облаков с нулевым значением $dV35$ составила 10/11% (О-З/О-О), а в постмуссонный – 18/15%. Медиана параметра $dV45$ была равна 0 км³ для всех рассматриваемых категорий облаков и разрядов. Максимальное значение составило 401 км³ в постмуссонный период. $dV45$ был больше 0 в менее чем 1% грозовых облаков муссонного периода и чуть более 40% постмуссонных облаков.

Анализ характеристик осадков показал, что постмуссонные грозовые облака характеризовались более интенсивными осадками, что подтверждается значениями интенсивности и потока осадков. Так, медиана потока осадков F (О-З) составила 172,2 и

316,0 м³/сек (муссон и постмуссон соответственно). Значения О-О мало отличались и были равны 199,9 и 321,3 м³/сек. Значения интенсивности осадков I_m в рассмотренных грозовых облаках были достаточно малы, максимальное значение за все время наблюдений не превышало 30 мм/ч. Медиана I_m в период муссона для О-З/О-О составила 5,3/5,7 мм/ч. I_m в постмуссонных облаках была равна 7,5/7,7 мм/ч.

На основании данных радиолокационных наблюдений были рассчитаны значения критерия грозоопасности Y . Для облаков с разрядами О-З значения в муссонный и постмуссонный период составили 21,1 и 23,1. В то время как соответствующие значения постмуссонного периода отличались в большую сторону и были равны 25,8 и 29,9 (рис. 2.6).

Таблица 2.3 – Статистические характеристики радиолокационных параметров грозовых облаков различных периодов (муссонный / постмуссонный), для рассматриваемых типов разрядов (О-О и О-З).

Параметр	Тип разряда	N	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Ст. откл.
f , мин ⁻¹	О-З	68 / 1014	0,4 / 0,5	0,3 / 0,3	0,3 / 0,3	1,1 / 5,5	0,2 / 0,5
	О-О	63 / 1194	0,3 / 0,6	0,3 / 0,3	0,3 / 0,3	0,8 / 5,5	0,1 / 0,6
I_m , мм/ч	О-З	68 / 1014	5,9 / 7,8	5,3 / 7,5	3,1 / 2,8	12,1 / 29,6	2,0 / 3,0
	О-О	63 / 1194	6,2 / 8,0	5,7 / 7,7	3,3 / 0,0	15,1 / 29,6	2,2 / 3,2
$BГО$, км	О-З	68 / 1014	8,8 / 10,1	8,8 / 9,9	6,1 / 6,1	13,6 / 17,4	1,6 / 3,1
	О-О	63 / 1194	8,6 / 10,3	8,4 / 10,3	6,1 / 6,1	12,9 / 17,4	1,3 / 3,1
Z_{max} , дБZ	О-З	68 / 1014	41,2 / 44,8	40,5 / 46,0	32,5 / 31,0	51,5 / 57,0	4,2 / 6,1
	О-О	63 / 1194	42,2 / 45,1	41,5 / 46,0	32,5 / 31,5	51,5 / 58,0	4,5 / 6,0
$dV35$, км ³	О-З	68 / 1014	55,1 / 324	24,0 / 106	0,0 / 0,0	418 / 4993	75,5 / 573
	О-О	63 / 1194	53,1 / 331	31,0 / 115	0,0 / 0,0	407,0 / 4993	77,5 / 569
$dH35$, км	О-З	68 / 1014	2,3 / 3,7	2,0 / 3,5	0,0 / 0,0	4,5 / 9,5	1,3 / 2,6
	О-О	63 / 1194	2,2 / 3,9	2,5 / 4,5	0,0 / 0,0	4,5 / 9,5	1,2 / 2,6

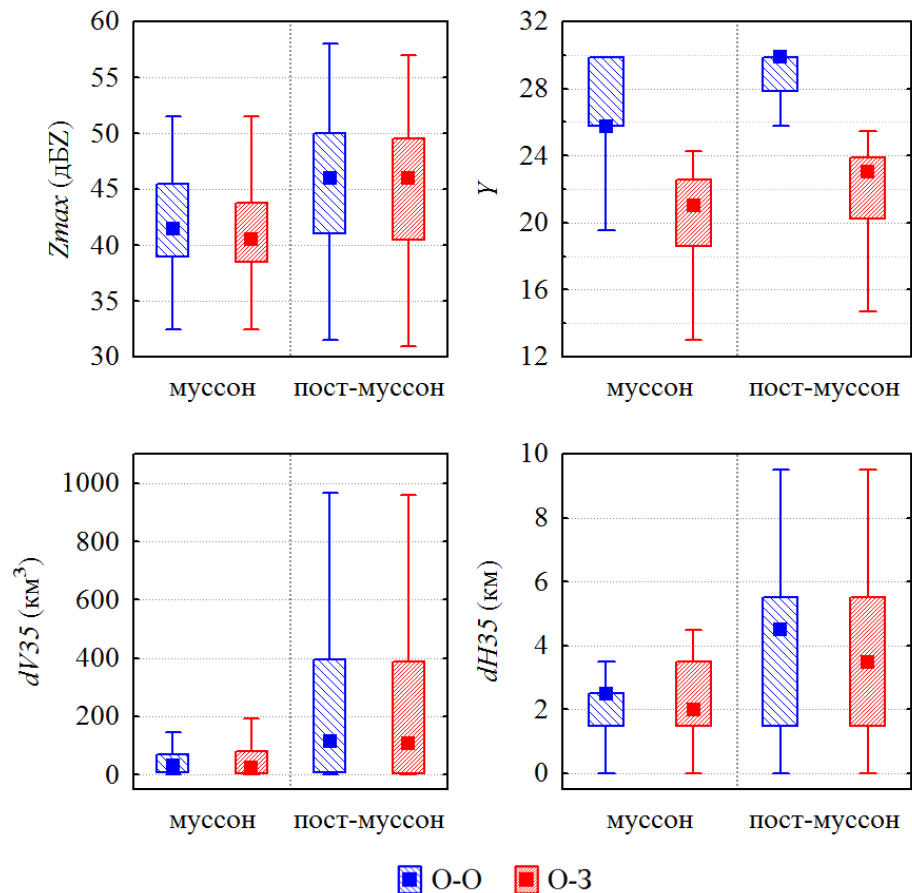


Рисунок 2.6 – Радиолокационные характеристики муссонных и постмуссонных грозовых облаков для разрядов типа облако-земля (О-З) и внутриоблачных и облако-облако (О-О): максимальная отражаемость Z_{max} , критерий грозоопасности Y , объем переохлажденной части облака выше изотермы 0°C с отражаемостью более 35 дБЗ – dV_{35} , вертикальная мощность переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБЗ - dH_{35}

Рассмотрены электрические характеристики облаков. Медиана частоты разрядов f была равна $0,3 \text{ мин}^{-1}$ при всех анализируемых условиях. Однако средние значения f в муссонный период ($0,4/0,3 \text{ мин}^{-1}$ для О-З/О-О) были ниже, чем в постмуссонный ($0,5/0,6 \text{ мин}^{-1}$). Наименьшее значение, ожидаемо, зарегистрировано в муссонных облаках ($0,8 \text{ мин}^{-1}$, О-О), наибольшее – в постмуссонных ($5,5 \text{ мин}^{-1}$, О-З и О-О). Только 3% облаков имели f (О-З) больше 1 мин^{-1} в муссонный период и 10% - в постмуссонный. Аналогичные оценки f (О-О) составили 0% и 16%.

Всего в исследуемый период было зарегистрировано 5292 разряда, к муссонному периоду относятся 180 из них, что составляет 3%. 55% всех разрядов приходится на долю О-З. При этом количество дней, когда наблюдалась грозовая активность, было равно 24, из них 10 дней были определены как сезон действия муссонов.

Распределения величин силы тока I разрядов различных типов для всех сезонов приведены на рис. 2.7. Показано, что наибольшие абсолютные значения I связаны с положительными токами О-З, наблюдавшимися в период муссонов. Разряды облако-земля имели большие значения I , чем разряды облако-облако (для обоих сезонов). В всех облаках положительные токи О-З были больше отрицательных. Медиана положительных/отрицательных токов в муссонный период составила 36,8/23,2 кА, в постмуссонный – 35,0/19,0 кА. При этом соответствующее значение токов О-О не превышает 11 кА, это значение практически не зависит от сезона и полярности разряда.

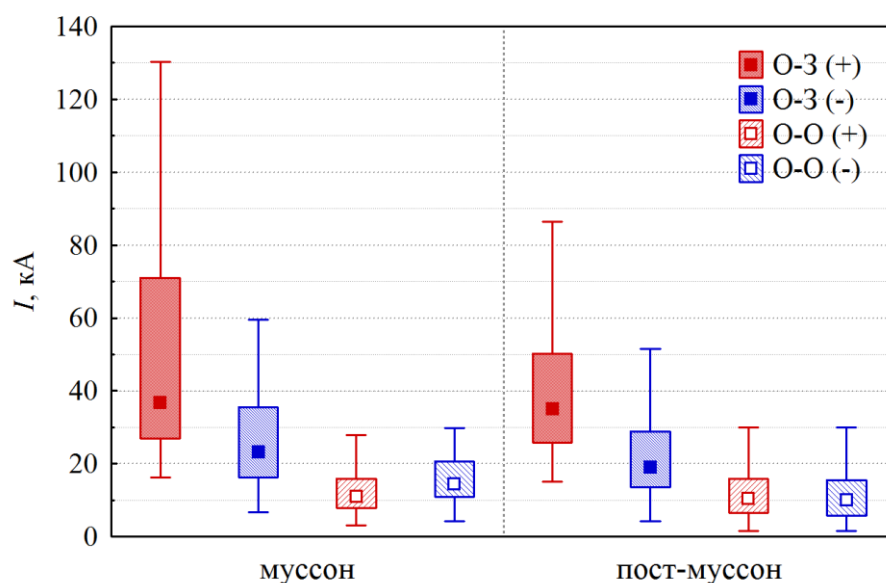


Рисунок 2.7 – Значения (абсолютные) положительных и отрицательных токов электрических разрядов различных типов, связанных с грозовыми облаками, для муссонного и постмуссонного периода

Анализировались радиолокационные параметры облаков при переходе в грозовую стадию с различной заблаговременностью dt : за 3 обзора радиолокатора до разряда (-11 мин), за 1 обзор (-3 мин) и во время скана, соответствующего регистрации первых разрядов (0 мин). Рассмотрены медианы распределений параметров при различных типах разрядов и значимость их различий (при помощи рангового критерия Уилкоксона). По большей части эти различия оказались статистически незначимы.

Статистически значимые различия медиан распределений (уровень значимости $p \leq 0,05$) были выявлены для параметров, приведенных в табл.2.4 (параметры сгруппированы по сезону, типу разрядов и заблаговременности).

Таблица 2.4 – Статистически значимые изменения медиан распределений значений радиолокационных параметров облаков при переходе в грозовую стадию

Тип разряда	Заблаговременность	Параметр	Относительное изменение медианы
Муссонные облака			
О-З	11 мин	F	-35%
		Im	-11%
		VIL	-26%
О-О		Im	-17%
		ВГО	-8%
		Zmax	-6%
		VIL	-23%
		dV35	-76%
		dH30	-22%
		dH35	-40%
		Y	-6%
О-З	3 мин	F	18%
О-О		нет	
Постмуссонные облака			
О-З	11 мин	Im	-10%
		Zmax	-3%
		dV30	3%
		Y	6%
О-О	нет		
О-З	3 мин	Im	-8%
		ВГО	-4%
		VIL	-1%
О-О		Im	-6%
		Zmax	1%
		VIL	-10%
		dH35	-29%
		Y	-3%

В табл. 2.4 изменения медианы (%) рассчитывались относительно значения до начала разрядов (положительные значения говорят об увеличении значения при начале грозовой активности, отрицательные – об уменьшении, см. формулу 2).

$$X = \frac{(X_{BL} - X_L)}{X_{BL}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где X_{BL} – значение параметра до начала разрядов, X_L – значение во время скана, соответствующему первым зарегистрированным электрическим разрядам.

Приведенные значимые изменения параметров демонстрируют, что в муссонный период при $dt = 11$ мин, значения характеристик в основном уменьшаются при переходе облаков в грозовую стадию. Величина этого уменьшения составляет от 6% (максимальная радиолокационная отражаемость, критерий грозоопасности Y) до 76% ($dV35$). Набор значимых параметров зависит от типа разряда за исключением двух характеристик: приведенной водности и интенсивности осадков. При $dt = 3$ мин различия медиан статистически незначимы.

В облаках постмуссонного периода, наоборот, большее количество параметров имели значимые изменения при заблаговременности $dt = 3$ мин. Все изменения также говорят об уменьшении значений при переходе в грозовую стадию (за исключением Z_{max}) и составляют от -1% (VIL) до -29% ($dH35$). Аналогично муссонному периоду, значимыми для всех типов разрядов оказались только два параметра: VIL и Im . При заблаговременности 11 мин изменения имеют разный знак: интенсивность осадков и радиолокационная отражаемость уменьшается, в то время как $dV30$ и Y -критерий увеличиваются. Все изменения значимы только для О-3. Изменения максимальной радиолокационной отражаемости и $dV35$ приведены на рис. 2.8.

Приведенные результаты изменения характеристик радиолокационных параметров облаков в Индии при переходе в грозовую стадию (их уменьшение) значительным образом отличаются от результатов, полученных для других регионов: северо-запада России и Северо-Кавказского региона РФ, где, как правило, отмечается увеличение значений параметров при начале разрядов.

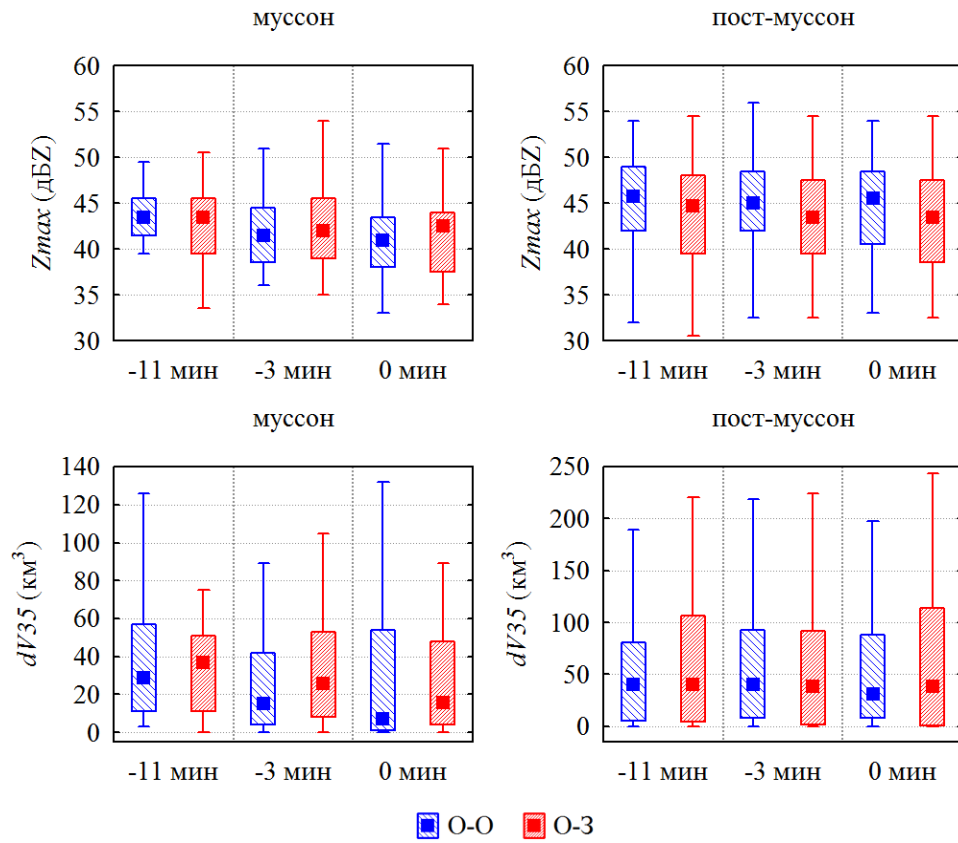


Рисунок 2.8 – Характеристики облаков при переходе в грозовую стадию для муссонного и постмуссонного периода

2.5 Сравнительные характеристики облаков, переходящих в грозовую стадию, для различных регионов РФ и Индии

В данном разделе представлены характеристики облаков, переходящих в грозовую стадию для северо-запада России, Северного Кавказа и Индии. Мощность выборки для каждого региона составила около 60 облаков, переходящих в грозовую стадию. Для Индии также были отобраны 60 облаков, развивавшихся в штате Карнатака (г. Гадаг, 2019 г.) в период окончания муссона. При написании текста раздела использованы материалы статьи, опубликованной при участии соискателя [104].

Были рассмотрены следующие радиолокационные характеристики: высота верхней границы облака (по уровню отражаемости 5 dBZ, H_{top} , км), максимальная отражаемость Z_{max} (dBZ), высота $H_{Z_{max}}$ (км) максимальной отражаемости и она же $dH_{Z_{max}}$ (км) относительно изотермы 0 °С, а также вертикальная мощность облака dH_{35} и dH_{45} (км) и объемы облака dV_{35} и dV_{45} (км³) выше изотермы 0 °С для областей с отражаемостью, превышающей порог 35 и 45 dBZ.

Как было описано в разделе 2.1, исследовались характеристики облаков во время обзора радиолокатора, предшествовавшего первому разряду, и во время обзора, когда регистрировались первые разряды. Различия грозовой активности достаточно хорошо иллюстрируются статистическими параметрами частоты разрядов (табл. 2.5). На северо-западе РФ наблюдалась наименьшая частота молний (среднее значение – 0,2 мин⁻¹, медиана – 0,3 мин⁻¹). Несколько большими величинами характеризуются облака в Индии, где среднее составило 0,3 мин⁻¹, а медиана – 0,5 мин⁻¹. Наибольшая частота молний наблюдалась на Северном Кавказе: 1,2 мин⁻¹ (среднее) и 2,6 мин⁻¹ (медиана).

Таблица 2.5 – Статистические характеристики частот молний (мин⁻¹) различных регионов

	Индия	Сев Кавказ	Северо-запад
Медиана	0,3	1,2	0,2
Среднее	0,5	2,6	0,3
σ	0,6	3,6	0,2

Статистические характеристик радиолокационных параметров облаков приведены в таблице 2.6. Данные демонстрируют существенные различия облаков разных регионов как в

значениях во время начала разрядов, так и в части значимости медиан распределений до / во время начала грозовой активности.

Так, медиана высоты верхней границы облаков при начале разрядов составляет 13,5 км для Индии, 11,1 км для Северного Кавказа и 9,5 км для СЗ РФ. При этом максимальная радиолокационная отражаемость в Индии составила всего лишь 45,5 dBZ, в то время как на Северном Кавказе ее значение было равно 51 dBZ, а на Северо-Западе России – 52 dBZ. Уровень максимальной отражаемости в Индии и на Кавказе располагался на 0,8 и 1,0 км выше нулевой изотермы, тогда как на Северо-Западе медианное значение находилось на 0,8 км ниже изотермы 0°C. Особое внимание на себя обращают различия величины переохлажденных объемов в облаках. Так, dV_{35} в Индии, несмотря на наибольшее значение высоты верхней границы, имел наименьшее значение - 42 км³. На Северо-Западе dV_{35} был равен 72 км³, максимум наблюдался на Кавказе – 206 км³. При этом медиана параметра dV_{45} в Индии была равна 0, в отличие от остальных регионов (11 и 25 км³ для СЗ и Кавказа соответственно).

Таблица 2.6 – Статистические характеристики исследуемых параметров до разряда (числитель) и во время скана радиолокатора, соответствующего началу разрядов (знаменатель)

Регион	Параметр	p-value	Среднее	Ст. отклонение	Медиана	Максимум
Индия	H_{top}	0,01	12,7/13,2	1,6/1,5	12,5/13,5	14,5/14,5
	Z_{max}	0,8	44,7/44,5	4,4/4,4	45/45,5	53,5/54
	H_{Zmax}	0,38	5,4/5,2	1,7/1,7	5,8/5,8	8/8,75
	dH_{Zmax}	0,38	0,4/0,2	1,7/1,7	0,8/0,8	3/3,75
	dH_{35}	0,59	3,6/3,5	1,5/1,9	4,5/3,5	7,5/8,5
	dH_{45}	0,92	1/1,1	1,4/1,6	0/0	4,5/5,5
	dV_{35}	0,41	64,5/76,3	72/86,5	30/42	336/370
	dV_{45}	0,79	5,1/5,7	12,1/11,3	0/0	74/56

Продолжение таблицы 2.6

Регион	Параметр	p-value	Среднее	Ст. отклонение	Медиана	Максимум
Северный Кавказ	H_{top}	0,00	10,1/11,4	2/2,4	9,5/11,1	16/16
	Z_{max}	0,00	46,3/52,6	7/6	46/51	61/70
	H_{Zmax}	0,1	4,9/4,6	1,1/1,6	4,5/4,5	9,5/8
	dH_{Zmax}	0,1	1,2/0,9	1,7/1,4	1/1	4,6/4,6
	dH_{35}	0,00	3,2/4,7	1,8/1,8	3,2/4,4	7,9/8,4
	dH_{45}	0,00	1,2/2,5	1,9/2,2	0/1,7	7,2/7,7
	dV_{35}	0,00	178/335	251/318	62/206	1040/1730
	dV_{45}	0,00	33,3/76,5	81,1/139	1/25	387/719
Северо- Запад России	H_{top}	0,00	8,7/10	1,4/1,6	8,5/9,5	12,5/13,5
	Z_{max}	0,00	49,2/52,7	4,4/3,3	49/52	60,5/59
	H_{Zmax}	0,00	2,2/1,8	0,9/0,5	1,5/1,5	4,5/3,5
	dH_{Zmax}	0,00	-0,5/-0,9	0,8/0,7	-0,7/-0,8	2,1/0,6
	dH_{35}	0,00	2,6/3,2	1,1/1,2	2,6/3,2	5,8/5,7
	dH_{45}	0,00	0,7/1,3	0,7/1	0,6/1,2	2,6/4,6
	dV_{35}	0,00	65/108	48,6/82,2	53,5/79	234/422
	dV_{45}	0,00	7,9/19,5	12/23,4	3/11	62/114

Уровень значимости различий медиан распределений выборок облаков перед началом разрядов и при разрядах демонстрирует, что в Индии все различия (за исключением высоты верхней границы) оказались незначимы. В то время как в остальных регионах все различия оказались статистически значимы. Единственный значимый для всех трех регионов параметр H_{top} (медиана) в облаках Индии во время начала разрядов на 1 км превышает соответствующее значение до начала грозовой активности. Аналогичные результаты получены для Северо-

Запада. На Кавказе значение N_{top} во время разрядов также больше, чем перед их началом, но уже на 1,6 км.

Для Северо-Запада и Северного Кавказа оказались значимыми различия медиан следующих рассмотренных параметров: N_{top} , Z_{max} , dN_{35} , dN_{45} , dV_{35} , dV_{45} . Так, значения медиан Z_{max} для обзоров перед началом/во время первых молний составили 45/51 dBZ (Кавказ) и 49/52 dBZ (Северо-Запад). Медианы dN_{35} составили 2,6/3,2 км (СЗ РФ) и 3,2/4,4 км (Кавказ). Соответствующие переохлажденные объемы облака – 54/79 км³ (СЗ) и 62/206 км³ (Кавказ). В Индии объемы с отражаемостью более 45 dBZ были малы, медиана обеих выборок составила 0. В остальных регионах значения были отличны от нуля и равны 3/11 км³ (СЗ) и 1/25 км³ (Кавказ).

Распределения исследованных радиолокационных параметров представлены на рис. 2.9, где показаны значения во время скана радиолокатора, предшествующего началу грозовой активности (-10 мин), и соответствующего началу молний (0 мин). Продемонстрированы особенности, выявленные в ходе анализа данных. Так, показано, что, хотя облака в Индии и достигают значительных высот, но при этом имеют небольшие значения максимальной радиолокационной отражаемости и переохлажденных объемов, а значения параметров при начале разрядов меняются мало. В предшествующих разделах уже отмечалось, что для региона Индии характерно малое содержание ледяных частиц, что в итоге косвенно подтверждается значениями отражаемости. Показано, что для облаков Северо-Запада России и Северного Кавказа характерны большие значения при начале разрядов, чем до их регистрации. 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.

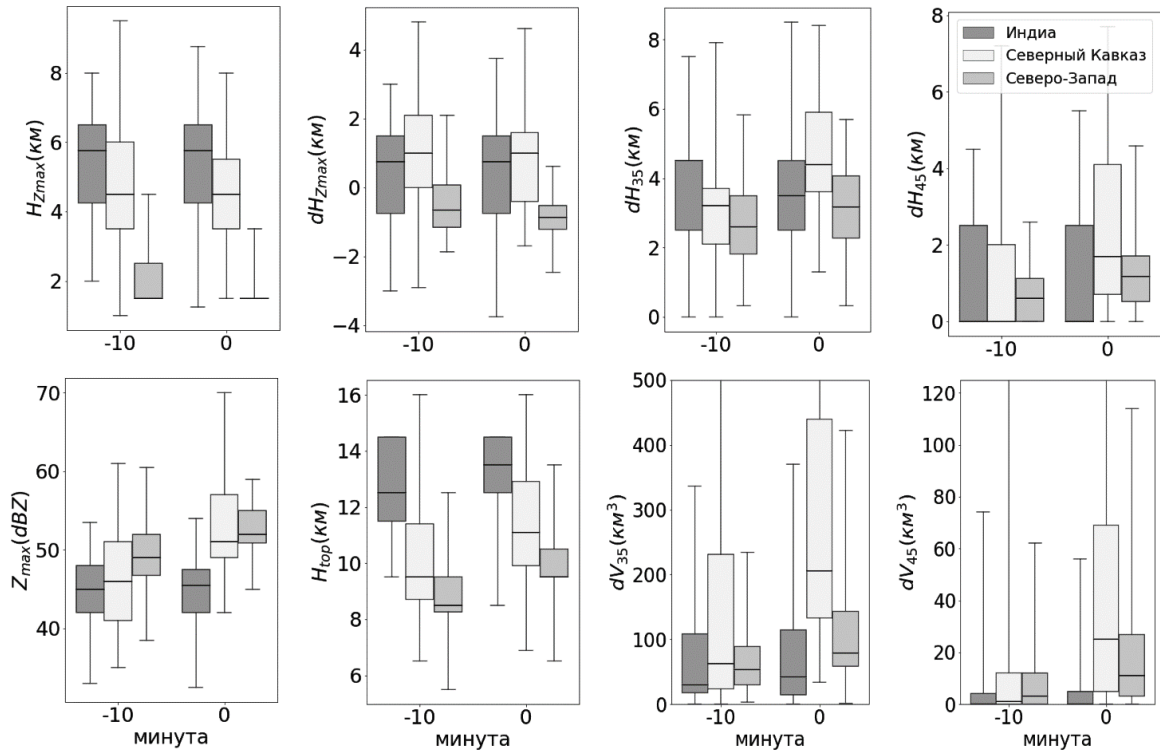


Рисунок 2.9 – Диаграмма разброса выборок радиолокационных характеристик для двух сканов радиолокатора. 0 минута – скан, в котором зафиксированы разряды, -10 мин - скан за 10 мин до разрядов. «Ящик» определяет положение квантилей 25 и 75 %, синяя линия внутри ящика – медиана, «усы» обозначают минимальное и максимальное значение в выборке [104].

2.6 Линейные связи между электрическими и радиолокационными характеристиками грозовых облаков

Поля облаков

Проанализированы по имеющимся данным возможные линейные связи между электрическими и радиолокационными характеристиками грозовых облаков. В качестве электрической характеристики облаков использована частота разрядов («облако-земля», а также «облако-облако» и внутриоблачных). Рассмотрены связи со следующими радиолокационными параметрами облаков: поток F и наибольшая интенсивность осадков I_{\max} , высота уровня отражаемости 30 дБЗ H_{30} , радиолокационный критерий грозоопасности Y , максимальная радиолокационная отражаемость в облаке Z_{\max} , объемы переохлажденной части облака выше изотермы 0°C , превышающие установленные пороги радиолокационной отражаемости (dV_{35} , dV_{40} , dV_{50}).

Были реализованы два подхода к оценке возможных линейных связей. В рамках первого подхода рассчитывались коэффициенты корреляции указанных характеристик для полей грозовых облаков различных сезонов в Индии (100 облаков муссонного периода в г. Гадаг и 129 облаков постмуссонного периода в г. Гадаг и г. Аурангабад). Характеристики полей облаков и особенности статистических распределений приведены в предыдущем разделе работы.

В рамках второго подхода анализировались отдельные выбранные грозовые облака, оценивались корреляционные связи между параметрами на протяжении их развития. Связи рассмотрены на примере двух грозовых облаков постмуссонного периода, просуществовавших достаточно долгое время и находившихся на всем протяжении развития в поле обзора радиолокатора. Также приведены результаты исследований мощных грозовых облаков в других регионах мира: в Северо-Западном и Северо-Кавказском регионах России, в Китае.

В обоих подходах для оценки наличия и силы линейных связей использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена, т.к. распределения исследуемых величин не являются нормальными.

В рассмотренном поле грозовых облаков постмуссонного периода в штате Махараштра (2015 г.) коэффициент ранговой корреляции r оказался больше значения 0,5 и значим для следующих радиолокационных параметров: высота уровня отражаемости 30 дБЗ ($r = 0,56$, коэффициент детерминации $r^2 = 0,31$), Y -критерий грозоопасности ($r = 0,69$, $r^2 = 0,48$), объем переохлажденной части облака dV_{35} ($r = 0,61$, $r^2 = 0,37$). Незначимыми и меньше значения 0,5 оказались коэффициенты корреляции для следующих параметров: поток осадков ($r = 0,36$), интенсивность осадков (0,32), максимальная радиолокационная отражаемость (0,25), объемы

переохлажденной части облака dV_{40} и dV_{50} ($r = 0,30$ и $r = 0,41$ соответственно). Все рассчитанные коэффициенты корреляции приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, рассчитанные для частоты электрических разрядов и радиолокационных параметров грозовых облаков в Индии.

Радиолокационные параметры	Поле конвективных ячеек (штат Махараштра, 2015 г.)	Поле конвективных ячеек (штат Карнатака, 2019 г.): все ячейки / муссонный период / постмуссонный период	Облако 1 (2015 г.) / Облако 2 (2019 г.)
Поток осадков, м ³ /с	0,36	0,64 / 0,30 / 0,76	0,61 / 0,60
Интенсивность осадков, мм/ч	0,32	0,39 / 0,03 / 0,44	0,57 / 0,40
Высота уровня отражаемости 30 дБZ, км	0,56	0,61 / 0,24 / 0,77	0,39 / 0,56
Максимальная радиолокационная отражаемость, дБZ	0,25	0,51 / 0,04 / 0,70	0,54 / 0,46
У-критерий грозоопасности	0,69	0,62 / 0,15 / 0,81	- / 0,47
Объем переохлажденной части облака выше изотермы 0 ⁰ C с отражаемостью более 35 дБZ	0,61	0,65 / 0,27 / 0,84	0,70 / 0,62
Объем переохлажденной части облака выше изотермы 0 ⁰ C с отражаемостью более 40 дБZ	0,30	0,61 / 0,06 / 0,84	0,64 / 0,54

Значительно более высокими значения коэффициентов ранговой корреляции оказались для грозовых облаков постмуссонного периода в штате Карнатака (2019 г.). Значимыми оказались связи с параметрами: поток осадков ($r = 0,76$), высота уровня отражаемости 30 дБZ (0,77), максимальная радиолокационная отражаемость (0,70), Y-критерий грозоопасности (0,81), объемы переохлажденной части облака dV_{35} и dV_{40} (0,84 для обоих параметров).

Оцененные коэффициенты ранговой корреляции для грозовых облаков муссонного периода для всех рассматриваемых параметров оказались незначимыми и изменялись в пределах от 0,04 до 0,3. Дополнительно была проведена оценка коэффициентов корреляции для всех рассмотренных облаков в штате Карнатака, коэффициенты корреляции оказались значимыми для тех же параметров, что и для грозовых облаков постмуссонного периода в этом штате, но их значения уменьшились (табл. 2.7).

Все полученные зависимости не могут быть аппроксимированы уравнениями линейной регрессии: модели имеют незначимые коэффициенты, малую долю объясненной регрессии.

Было рассмотрено развитие двух грозовых облаков в постмуссонный период: Облако 1 в штате Махараштра (2015 г.) и Облако 2 в штате Карнатака (2019 г.). Оценивались линейные связи всех рассмотренных радиолокационных параметров и частоты разрядов (табл. 2.7).

Облако 1

Облако 1 развивалась вблизи г. Аурангабад 04 октября 2015 года. Рассматриваемое облако отделилось от материнского и наблюдалась по данным радиолокатора с 6:53 до 9:24 (UTC+5:30). В ходе развития облака наблюдалось взаимодействие входящих в его состав ячеек, в т.ч. происходило их слияние.

Наибольшая высота уровня отражаемости 30 дБZ (H_{30}) в момент начала наблюдений составляла 9,1 км, достигнув наибольшего значения 12,1 км на 90-ой мин (рис. 2.10). Начиная со 113-ой мин облако перешло в стадию стационарирования и диссипации. H_{30} на стадии диссипации достаточно быстро уменьшилась с 9,1 км до 6,1 км.

Изменение во времени основных радиолокационных и электрических параметров рассматриваемого многоячейкового облака приведены на рисунках 2.10 (*a* и *b*). С момента начала наблюдений за облаком, регистрировались выпадающие из него осадки. Наибольшая их интенсивность составила 21,1 мм/ч вскоре после начала наблюдений за облаком (отделения ячейки от родительского облака). Зафиксирован локальный максимум – 17,8 мм/ч (90 мин). В это же время наблюдалось максимальное значение потока осадков из облака – 603 м³/с. Также этому моменту времени соответствует наибольшая зафиксированная радиолокационная отражаемость, которая составила 53 дБZ.

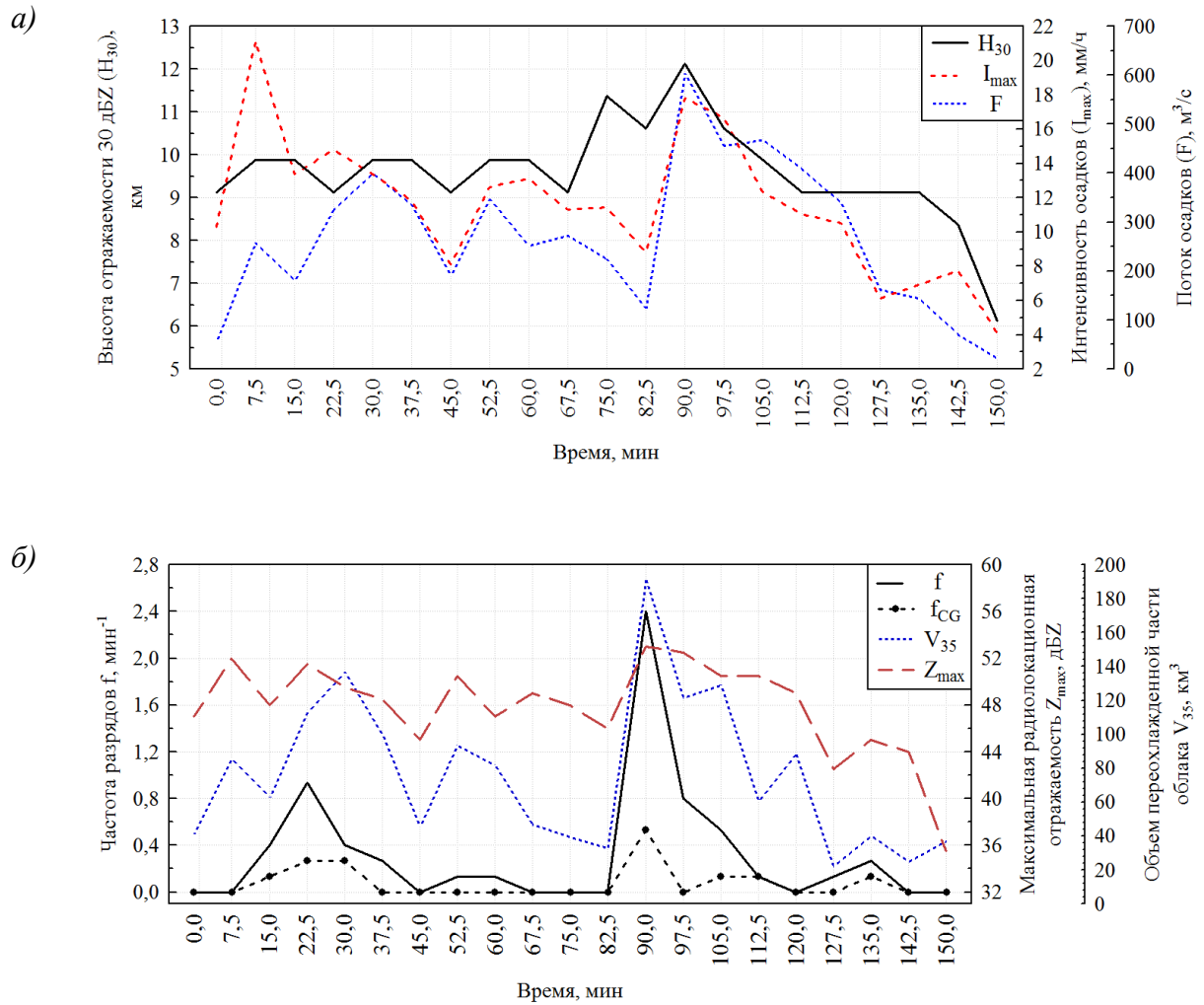


Рисунок 2.10 – Временной ход радиолокационных и электрических параметров многоячейкового грозового облака в штате Махараштра 04 октября 2015 года: а) высоты отражаемости 30 дБZ (H_{30}), максимальной интенсивности осадков (I_{max}), потока осадков (F); б) частоты разрядов всех типов f и разрядов «облако-земля» f_{CG} , объема переохлажденной части облака dV_{35} , максимальной радиолокационной отражаемости в облаке Z_{max}

Начало молниевой активности в рассматриваемом облаке произошло на 8 мин наблюдений. Наибольшая частота разрядов составила $2,4 \text{ мин}^{-1}$ и по времени совпала с максимумом осадков и радиолокационной отражаемости. На рисунке 2.10б приведен временной ход суммарной частоты разрядов f и частоты разрядов О-З (f_{CG}), с которыми связывают наибольшие значения электрических токов. Число зарегистрированных разрядов О-З составляет чуть менее половины всех зарегистрированных разрядов (43%, 21 разряд из 49). f_{CG} отлична от нуля для 7-ми обзоров радиолокатора из 21

рассмотренных. Больше нуля во время 12-ти обзоров радиолокатора. Наибольшая частота О-З наблюдалась в момент максимального развития облака (90 мин).

Нормированная частота разрядов f/V_{35} достигла наибольшего значения 0,013 также в момент максимального развития, ее значение говорит о том, что для формирования одного разряда в минуту понадобилось 77 км^3 переохлажденной части облака. Максимальное значение нормированной частоты разрядов «облако-земля» составило 0,003, соответствует участию 333 км^3 переохлажденной части облака dV_{35} в формировании одного разряда «облако-земля» в минуту.

Таким образом, наибольшая электрическая активность рассматриваемого многоячейкового облака наблюдается в момент его максимального развития, незадолго до перехода в стадию диссипации. Момент максимального развития облака выделяется во временном ходе радиолокационных параметров облака максимумом почти всех рассмотренных величин: высоты уровня отражаемости 30 дБZ, потока осадков, максимальной радиолокационной отражаемости, объема переохлажденной части облака V_{35} . Аналогичные результаты были получены ранее при рассмотрении развития мощного грозового облака в Северо-Кавказском регионе России [103]. В случае рассмотренного облака в Индии, максимуму предшествует слияние ячеек, что, по всей видимости, отразилось на характеристиках облака.

Рассчитанные коэффициенты ранговой корреляции показали, что существуют связи частоты разрядов f со следующими параметрами: поток осадков ($r = 0,61$), интенсивность осадков (0,57), максимальная радиолокационная отражаемость (0,54), объемы переохлажденной части облака dV_{35} (0,70), dV_{40} (0,64) и dV_{50} (0,62).

Зависимость частоты разрядов (временного хода) от радиолокационных параметров может быть описана уравнениями регрессии. Из всех рассмотренных параметров и построенных регрессионных моделей наилучшие результаты показала модель, основанная на объеме переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ (dV_{35}):

$$f = 0,0099 \cdot dV_{35} - 0,4386 \quad (r = 0,79; r^2 = 0,63; F = 32,05; p = 0,000),$$

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

Для прочих параметров доля объясненной дисперсии модели (коэффициент детерминации) составила менее 0,5 или коэффициенты уравнения были статистически незначимы.

Облако 2

Рассмотренное Облако 2 развивалось в штате Карнатака 01 октября 2019 года с 17:27 до 21:20 (UTC+5:30). Уровень N_{30} на момент появления облака на экране радиолокатора составил

9,1 км и достиг своего максимума (12,9 км) на 80-ой и 84-ой минуте развития. Наблюдается ряд локальных максимумов H_{30} (рис. 2.11а). К концу жизни облака (233-я мин) его высота составила 5,4 км.

С момента идентификации облака радиолокатором из него наблюдалось выпадение осадков. Максимум интенсивности осадков составил 20 мм/ч на 11-ой минуте и 14 мм/ч на 76-ой мин. Во время наибольшего абсолютного максимума интенсивности осадков, поток осадков составляет $270 \text{ м}^3/\text{с}$. Абсолютного максимума потока осадков достиг на стадии стационарирования облака на 138-ой мин и составил $471 \text{ м}^3/\text{с}$.

Максимальная радиолокационная отражаемость имела несколько близких по величинам максимумов. Первый из них – на 11-15 мин – составил 52 дБZ и соответствует максимуму интенсивности осадков. Второй максимум – на 80-ой мин – по времени соответствовал максимальному развитию облака и наибольшей высоте уровня H_{30} и также составил 52 дБZ. Третий максимум – абсолютный максимум Z_{max} за время развития облака – зарегистрирован на 103-й мин и составил 53 дБZ.

Изменение во времени объема переохлажденной части облака выше изотермы 0°C , превышающей порог отражаемости 35 дБZ (dV_{35}), представлен на рисунке 2.11б. Увеличение dV_{35} до 90 км^3 соответствует максимуму интенсивности осадков на 11-ой мин развития облака. Значение 134 км^3 достигнуто во время максимального развития облака (80-ая мин). Абсолютный максимум dV_{35} зарегистрирован на 130-ой мин и составил 340 км^3 . Такой временной ход объема переохлажденной части облака объясняется взаимодействием отдельных ячеек внутри многоячейкового облака.

Первые электрические разряды зафиксированы на 65-ой мин развития, в период общего увеличения всех характеристик: H_{30} , Z_{max} , интенсивности и потока осадков, dV_{35} . Максимум частоты разрядов f составил $1,4 \text{ мин}^{-1}$ на 80-ой мин развития облака, что соответствует максимуму уровня H_{30} , локальному максимуму интенсивности и потока осадков, максимальной радиолокационной отражаемости, dV_{35} . Значительное количество зарегистрированных электрических разрядов, связанных с облаком, приходится на период 118-131 мин, частота разрядов достигает значений $1,1 \text{ мин}^{-1}$. В этот же период наблюдались наибольшие значения переохлажденной части облака dV_{35} . С указанными периодами достижения абсолютного максимума f и наибольшей электрической активности облака связаны зарегистрированные разряды «облако-земля», частота которых f_{CG} на 149-153 мин составляла $0,9 \text{ мин}^{-1}$. Последние разряды в облаке зафиксированы на 176-ой мин развития, когда облако перешло в стадию диссипации и уменьшались все его характеристики: H_{30} , Z_{max} , F , I_{max} , dV_{35} .

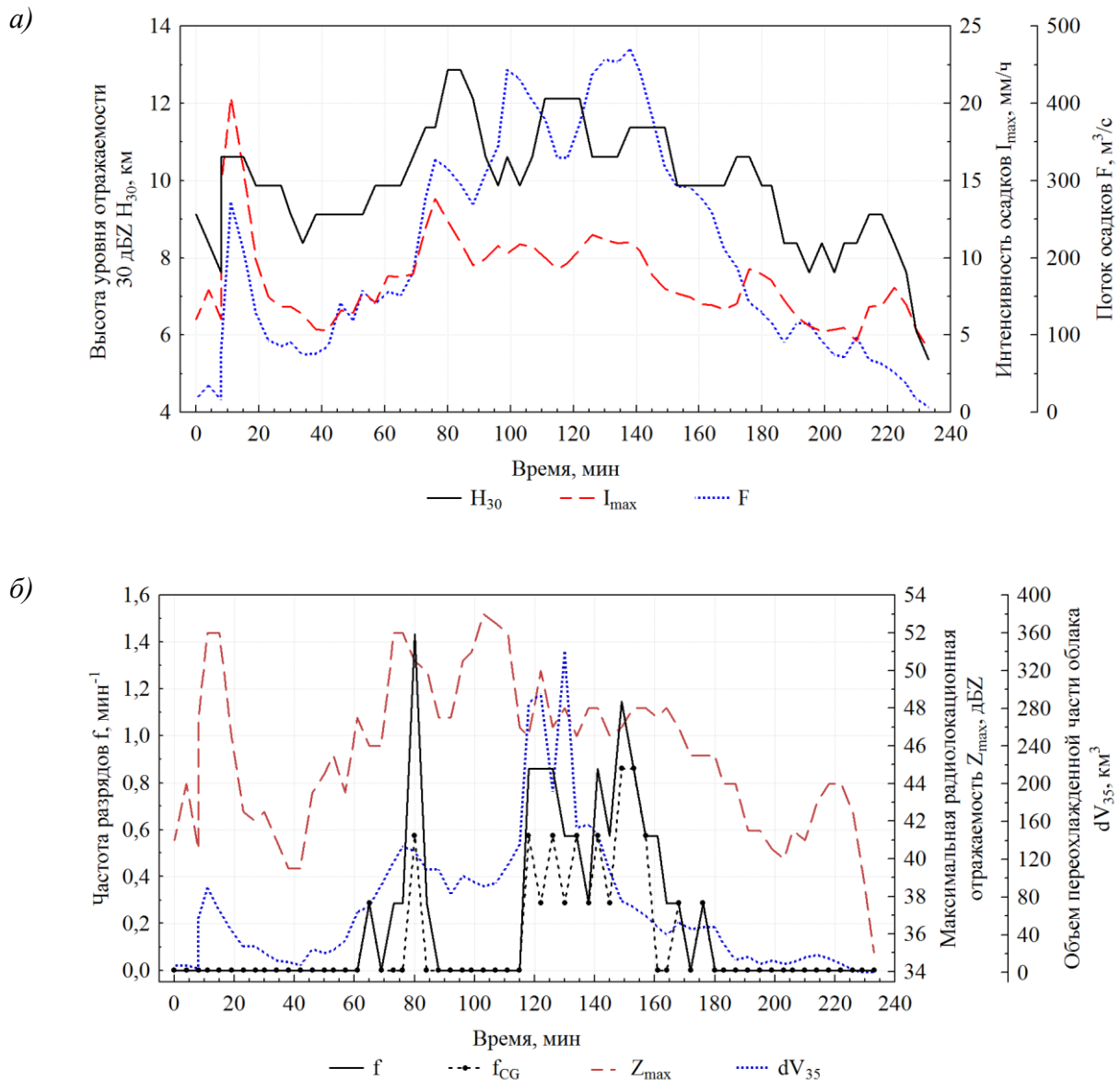


Рисунок 2.11 – Временной ход радиолокационных и электрических параметров многоячейкового грозового облака в штате Карнатака 01 октября 2019 года: а) высоты отражаемости 30 дБЗ (H_{30}), максимальной интенсивности осадков (I_{max}), потока осадков (F); б) частоты разрядов всех типов f и разрядов «облако-земля» f_{CG} , объема переохлажденной части облака dV_{35} , максимальной радиолокационной отражаемости в облаке Z_{max}

Нормированная на объем переохлажденной части облака dV_{35} частота разрядов f/dV_{35} достигает максимального значения 0,015 на 149-ой мин развития. Это соответствует утверждению, что для формирования одного разряда в минуту понадобилось $67 km^3$ переохлажденной части облака. Максимальное значение нормированной частоты разрядов «облако-земля» составило 0,012, соответствует участию $83 km^3$ переохлажденной части облака dV_{35} в формировании одного разряда «облако-земля» в минуту.

Можно отметить следующие закономерности, наблюдавшиеся в двух рассмотренных

облаках постмуссонного периода. В обоих облаках с момента появления их на экране радиолокатора регистрируются осадки. Первый максимум интенсивности осадков соответствует локальному максимум объема переохлажденной части облака. Первые электрические разряды зарегистрированы в период увеличения значений объема переохлажденной части облака dV_{35} . Абсолютный максимум электрических разрядов в обоих случаях совпадает с со стадией максимального развития облака и наибольшими значениями H_{30} . Период наиболее интенсивных разрядов совпадает по времени с достижением максимальных значений dV_{35} .

Указанные связи электрических и радиолокационных параметров подтверждаются значениями коэффициентов ранговой корреляции, которые приведены в таблице 2.7 и составляют (для Облака 1 и Облака 2, соответственно): для потока осадков – 0,61 и 0,60, для dV_{35} – 0,70 и 0,62, dV_{40} – 0,64 и 0,54. В облаке 1 также прослеживаются слабые значимые линейные связи с интенсивностью осадков (0,57) и максимальной радиолокационной отражаемостью (0,54), в то время как в Облаке 2 наблюдалась аналогичная связь с высотой уровня H_{30} (0,56).

Отдельно нужно отметить значения нормированной на объем переохлажденной части облака dV_{35} частоты разрядов f/dV_{35} . Наибольшие значения этой характеристики достигаются в период наибольшей молниевой активности в облаках и составляют 0,013 и 0,015, что соответствует 77 и 67 км³ dV_{35} (для облака 1 и облака 2 соответственно), участвующих в формировании одного электрического разряда в минуту. Эта характеристика позволяет оценить «эффективность» электрической активности облака, исходя из общих предположений о том, что в процессах электризации облаков важную роль играют ледяные частицы, особенно крупные, содержащиеся в переохлажденной части облака. Особый интерес представляет нормированная частота разрядов «облако-земля», т.к. с этими разрядами связаны наибольшие токи в облаках. Для облака 1 и облака 2 максимальные значения f_{CG}/dV_{35} составили 0,003 и 0,012, что соответствует 333 и 83 км³ переохлажденной части облака dV_{35} , участвующей в формировании одного разряда «облако-земля» в минуту.

Связи с параметром dV_{35}

Было проведено сравнение связей электрических и радиолокационных параметров, полученных в ходе исследования многоячейковых грозовых облаков, со связями, полученными для облаков разных географических регионов мира.

Для сравнения были выбраны случаи пяти мощных гроз, как без формирования связанных опасных конвективных явлений (Китай, г. Пекин), так и сопровождавшихся сильным градобитием (г. Санкт-Петербург, 22 июля 2017 года; г. Пятигорск, 29 мая 2012 г.) и

формированием водяных смерчей (Финский залив, 12 августа 2018 г.; Ладожское озеро, 6 августа 2018 г.). Случаи подробно описаны в публикациях [101, 105–108].

Во всех случаях рассматривались связи различных радиолокационных параметров облаков и частоты разрядов «облако-земля». Выбор типа разрядов обусловлен тем фактом, что именно с разрядами «облако-земля» связаны наибольшие электрические токи, из чего следует предположение, что с ними связаны также и наиболее интенсивные процессы электризации конвективных облаков. Среди исследуемых параметров рассматривались следующие: высота верхней границы облака, максимальная радиолокационная отражаемость в облаке, высота уровня максимальной отражаемости, максимальная отражаемость на уровне изотермы -22°C , объемы переохлажденной части облака ($dV_{35} - dV_{55}$), максимальная интенсивность осадков, поток осадков, критерий грозоопасности Y . Из всех проанализированных радиолокационных параметров был выделен объем переохлажденной части облака выше изотермы 0°C , превышающий отражаемость 35 дБZ – dV_{35} [96].

Значения коэффициента ранговой корреляции приведены в таблице 2.8 и для других регионов изменялись от 0,76 до 0,94, в зависимости от рассматриваемого случая. В выбранных для исследования облаках постмуссонного периода в Индии коэффициент корреляции существенно меньше – 0,52 и 0,54. Такое отличие объясняется тем, что облака с облаками других регионов (в четырех случаях из пяти рассмотренных) связано формирование опасных конвективных явлений (град, водяные смерчи, большая частота электрических разрядов), что указывает на большую мощность и экстремальность развивавшихся процессов физических процессов. В то время как облака в Индии были выбраны не исходя из экстремальности связанных с ними явлений или частоты разрядов, а с целью проследить весь путь развития отдельного облака в исследуемый период. Кроме того, отличия могут быть связаны с особенностями электризации облаков в тропическом регионе, как было получено в предыдущих разделах: относительно малыми значениями радиолокационной отражаемости и объемов переохлажденной части облака, предположительно невысоким содержанием крупных ледяных частиц и др.

Таблица 2.8 – Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (r) и коэффициенты детерминации (r^2), рассчитанные для частоты разрядов «облако-земля» и объема переохлажденной части облака dV_{35} для грозовых облаков различных географических регионов (анализ временных рядов).

Регион	Индия (штат Махараштра)	Индия (штат Карнатака)	СЗ РФ (Санкт-Петербург)	СЗ РФ (Финский залив)	СЗ РФ (Ладожское озеро)	СК РФ (г. Пятигорск)	Китай (г. Пекин)
r	0,52	0,54	0,91	0,94	0,76	0,76	0,85
r ²	0,27	0,29	0,83	0,88	0,58	0,58	0,72

На рисунке 2.12а представлены диаграммы рассеяния соответствующих зависимостей, они достаточно сильно различаются. Случай развития облака с водяным смерчем над Финским заливом явно выделяется, как имеющий наиболее сильную связь между рассматриваемыми параметрами. Маркеры, соответствующие грозе в Китае, расположены в правом нижнем секторе, что указывает на очень большие объемы переохлажденной части облака. Предполагается, имело место завышение оценок объемов переохлажденной части за счет включения части облаков верхнего яруса, так как облако являлось частью мощной фронтальной системы. Рассматриваемые облака в Индийском регионе отличаются малыми объемами dV_{35} и малой частотой разрядов относительно других регионов.

На рисунке 2.12б приведены зависимости, наблюдаемые для рассматриваемых полей грозовых облаков в Индии для муссонного и постмуссонного сезонов в штате Махараштра (2015 г.) и Карнатака (2019 г.). Показано, что в рассматриваемом поле постмуссонных облаков в штате Карнака есть отдельные выбросы значений, указывающие на большие значения dV_{35} (более 3000 км^3) при относительно малых величинах f и большие значения частоты разрядов (более 5 мин^{-1}) при малых объемах dV_{35} (менее 500 км^3). Основная масса рассмотренных облаков, независимо от сезона, расположена вблизи отметки 0 и имеет частоту разрядов менее 2 мин^{-1} и dV_{35} менее 500 км^3 .

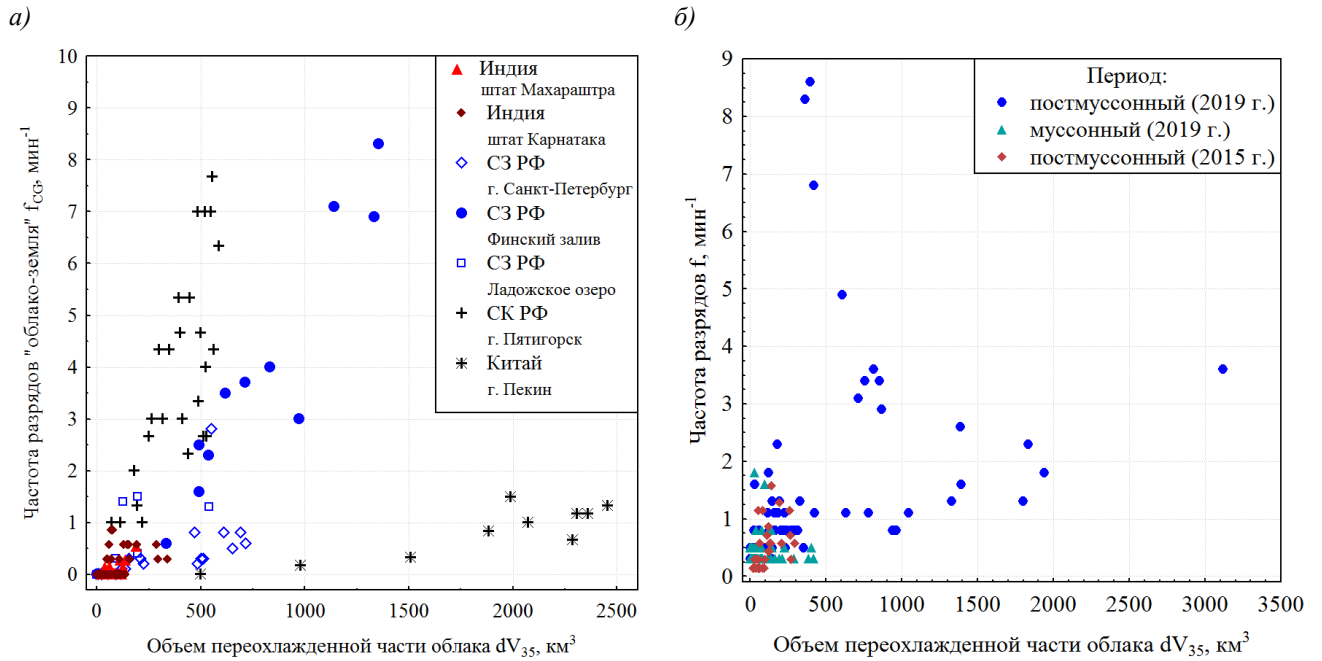


Рисунок 2.12 – Зависимость частоты разрядов f от объема переохлажденной части облака выше изотермы 0°C , с отражаемостью более 35 дБЗ – dV_{35} : а) при развитии отдельных мощных гроз, в том числе сопровождавшихся формированием опасных явлений, в различных регионах мира; б) для поля грозовых облаков в Индии муссонного и постмуссонного сезонов, наблюдаемых в штате Махараштра (2015 г.) и Карнатака (2019 г.)

Для рассмотренных облаков построены модели линейной регрессии с параметром dV_{35} . Модели и их характеристики приведены в табл. 2.9. Показано, что для 7 рассмотренных облаков различных регионов лишь в одном случае модель оказывается достаточно хорошей – доля объясненной дисперсии составляет 0,91 (СЗ РФ, Финский залив). В остальных случаях коэффициент детерминации варьируется от 0,23 до 0,51. Важным результатом является, что для одного из облаков в Индии (штат Махараштра) ранее была построена более успешная регрессионная модель ($r^2=0,63$), также основанная на параметре dV_{35} . Однако в указанном случае в качестве зависимой переменной выступала частота разрядов всех типов.

Выполненный регрессионный анализ показывает, что связи частоты разрядов с радиолокационными параметрами могут быть достаточно сильными (на что указывают значения рангового коэффициента Спирмена). Однако связи, по всей видимости, имеют сложный нелинейный характер и в большинстве случаев не могут описаны линейными регрессионными моделями.

Таблица 2.9 – Модели линейной регрессии (и их оценки) частоты разрядов «облако-земля» и объема переохлажденной части облака с отражаемостью более 35dBZ.

Регион	Уравнение регрессии	r	R2	F	p
Индия (штат Махараштра)	$Y = 0,0022 \cdot x - 0,0911$	0,71	0,50	19,27	0,000
Индия (штат Карнатака)	$Y = 0,0015 \cdot x + 0,0074$	0,48	0,23	18,58	0,000
СЗ РФ (Санкт- Петербург)	$Y = 0,014 \cdot x + 0,381$	0,61	0,38	13,75	0,001
СЗ РФ (Финский залив)	$Y = 0,0596 \cdot x - 7,4062$	0,95	0,91	105,71	0,000
СЗ РФ (Ладожское озеро)	$Y = 0,002 \cdot x + 0,309$	0,62	0,39	3,14	0,137
СК РФ (г. Пятигорск)	$Y = 0,5726 \cdot x + 14,535$	0,72	0,51	30,78	0,000
Китай (г. Пекин)	$Y = 0,025 \cdot x + 17,448$	0,69	0,48	7,34	0,027

2.7 Выводы к главе 2

1. Анализ характеристик разрядов в Индии показал, что наибольшие токи связаны с положительными разрядами облако-земля. В рассматриваемых выборках доля разрядов облако-земля составила от 35 до 55%.

2. Облака в тропических широт являются достаточно мощными, их высота верхней границы может достигать 17 км. При этом в них наблюдаются достаточно малые значения переохлажденных объемов dV_{35} (медиана составила 76 км^3), в то время как аналогичные значения для Северо-Запада России и Северного-Кавказа составили 108 и 335 км^3 соответственно. Также отмечается относительно невысокая частота разрядов: медиана составила $0,3 \text{ мин}^{-1}$, что больше аналогичного значения для Северо-Запада России ($0,2 \text{ мин}^{-1}$) и меньше показателей Северного Кавказа ($1,2 \text{ мин}^{-1}$).

3. Исследование радиолокационных характеристик грозовых облаков в Индии показало, что они имеют достаточно малые значения максимальной радиолокационной отражаемости – для различных сезонов и регионов Индии медиана распределений составила от 40 до 50 dBZ. Зафиксированное максимальное значение составило 58 dBZ. В то время как радиолокационная отражаемость в других регионах могла достигать 59 dBZ (Северо-Запад РФ) и 70 dBZ (Северо-Кавказский регион РФ). Принимая во внимание невысокие значения частоты разрядов в грозовых облаках, это может указывать на малое содержание крупных ледяных частиц в облаках Индии.

4. Показано, что характеристики грозовых облаков в Индии значительным образом различаются для муссонного и постмуссонного сезона. Показано, что в муссонный сезон облака имеют малую (относительно постмуссонного периода) высоту верхней границы, радиолокационную отражаемость, переохлажденные объемы облака и другие параметры.

5. Исследование значимости различий медиан распределений радиолокационных параметров облаков перед началом молниевой активности и во время регистрации первых разрядов для трех регионов (Северо-Запад РФ, Северный Кавказ, Индия) показал, что единственный параметр, имеющий статистически значимые различия, для всех трех регионов одновременно – высота верхней границы облака.

6. Для Северо-Запада РФ и Северного Кавказа при переходе облаков в грозовую стадию оказались статистически значимыми различия медиан следующих рассмотренных параметров: H_{top} , Z_{max} , dH_{35} , dH_{45} , dV_{35} , dV_{45} .

7. При переходе облаков в грозовую стадию значения радиолокационных параметров (H_{top} , Z_{max} , dH_{35} , dH_{45} , dV_{35} , dV_{45}) увеличиваются – в облаках Северо-Запада РФ и Кавказа. При этом увеличение на Кавказе большее по величине, чем на Северо-Западе. Это

может указывать на более интенсивные процессы облакообразования и электризации облаков на Кавказе.

8. Анализ изменения радиолокационных характеристик облаков при переходе грозовых облаков в Индии для различных типов разрядов, сезонов и с различной заблаговременностью показал наличие различных тенденций. Так, для муссонных облаков в основном оказались значимыми изменения с заблаговременностью 11 мин, а для постмуссонных – 3 мин. Практически для всех значимых параметров наблюдалось уменьшение рассматриваемых показателей при начале разрядов, в том числе для радиолокационной отражаемости и высоты верхней границы (для отдельных категорий облаков).

9. Оценки связей между частотой разрядов и различными радиолокационными параметрами (ранговый коэффициент Спирмена) показали наличие значимых связей в постмуссонных грозовых облаках Индии с высотой верхней границы, потоком осадков, максимальной радиолокационной отражаемостью, критерием грозоопасности Y , $dV35$ и $dV40$. При этом аналогичные связи отсутствовали (или были достаточно слабыми) в муссонных облаках. При этом линейные связи частоты разрядов и радиолокационного параметра $dV35$ для временных рядов развития отдельных облаков в Индии могли отсутствовать, в то время как для рассмотренных грозовых облаков (развитие которых сопровождалось опасными явлениями) других регионов коэффициент корреляции составил от 0,76 до 0,94. Для большинства значимых связей характерна малая доля объясненной дисперсии.

10. Большинство полученных связей частоты разрядов и радиолокационных параметров не могут быть описаны уравнениями линейной регрессии, что указывает на их сложный нелинейный характер.

Вклад соискателя при получении результатов и материалов, приведенных в Главе 2, состоял в обработке всех данных наблюдений для Индии и их статистическом анализе. Статистические характеристики грозовых облаков северо-запада России и Северного Кавказа получены научным коллективом (при участии соискателя) в рамках выполнения НИТР и гранта РФФИ (№ БРИКС_Т 18-55-80020).

Глава 3. Результаты моделирования грозовых облаков при помощи моделей конвективных облаков

В главе 3 приведены результаты численного моделирования развития конвективных облаков при помощи двух моделей: модели малой размерности (полуторамерной) и трехмерной нестационарной модели. При помощи трехмерной модели исследовались характеристики облаков при переходе в грозовую стадию, а также пространственное распределение характеристик в облаке.

Приведены результаты воспроизведения стратификации атмосферы при помощи мезомасштабной модели WRF, выполнено сравнение с данными аэрологических наблюдений. При помощи модели конвективного облака малой размерности выполнялись ансамблевые расчеты, позволившие получить статистические ансамбли параметров грозовых облаков при внесении возмущений в начальные данные (стратификацию атмосферы).

Соискатель благодарит руководство и сотрудников Главного вычислительного центра Росгидромета за предоставление вычислительного ресурса, с помощью которого были выполнены расчеты с использованием трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака.

3.1 Численные модели конвективных облаков

3.1.1 Полуторамерная модель конвективного облака

Полуторамерная модель конвективного облака была разработана в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова и подробно описана в монографии [109]. Модель может использоваться как в чисто исследовательских целях, так и для решения прикладных задач, включая оперативные работы (прогноз развития опасных конвективных явлений, оценка эффекта активных воздействий и др.).

Модель имеет несколько версий (Приложение В). Базовая модель осадкообразующего конвективного облака содержит уравнения гидротермодинамики и переноса субстанций, а также параметризованное описание микрофизических процессов. Базовая модель по мере разработки дополнялась моделью электризации конвективного облака и моделью, содержащей учет грубодисперсные аэрозольные примеси. Итоговая (полная) версия модели, по сути, содержит все указанные дополнения в виде отдельных блоков, которые могут быть включены в случае необходимости.

Отдельную версию модели представляет собой физико-статистическая модель развития конвективного облака и связанных с ним опасных явлений. Гидродинамическая часть этой модели (версии) соответствует базовой модели конвективного осадкообразующего облака. Модель имеет отличия в параметрическом описании микрофизических процессов: так, она не

учитывает мелкие облачные кристаллы. В дополнение к основным параметрам облака она содержит эмпирические критерии опасных явлений: грозоопасности, формирования градин опасного размера, обледенения летательных аппаратов и поражения их молнией и некоторые другие прикладные характеристики. Критерии применимы только для северо-запада РФ. На базе этой версии модели был разработан метод специального краткосрочного прогноза развития конвективной облачности и связанных с ней опасных явлений погоды. Указанный метод прошел процедуру независимого тестирования, показав высокую оправдываемость прогноза гроз [109].

В модели малой размерности конвективное облако представлено в виде гидродинамического течения с несущей паровоздушной фазой и взвешенных частиц (жидких и твердых) [109]. Облако взаимодействует с окружающей средой посредством упорядоченного втока (оттока) воздуха в область течения (и из нее) и турбулентного перемешивания. Облако представлено в форме цилиндра, радиус которого является постоянным в ходе расчета и входит в систему уравнений в качестве варьируемого параметра. Параметры облака, записанные в цилиндрической системе координат, осреднены по площади облачного цилиндра

Основные уравнения модели включают в себя: уравнение движения, неразрывности, сохранения энергии, баланса отношения смеси водяного пара, баланса отношения смеси облачных капель, дождевых капель, частиц кристаллических осадков. Система замыкается рядом дополнительных уравнений: уравнением состояния, уравнением гидростатики, выражением для насыщающего значения отношения смеси водяного пара над плоской поверхностью воды и льда.

В соответствии с параметрическим описанием микрофизических процессов полагается, что вся влага представлена в виде 4-х фракций: облачных и дождевых капель (жидкая фракция), облачных ледяных кристаллов и кристаллических частиц осадков (твердая фракция). Схема микрофизических переходов представлена на рис. 3.1.

Начальными данными являются результаты аэрологического зондирования (чаще всего, но возможен и другой источник данных): распределение по высоте давления, температуры и температуры точки росы. Дополнительно может быть задана максимальная прогнозируемая температура у поверхности земли.

Выходные параметры модели включают следующие: высота верхней границы облака, скорость восходящих движений, водность облачных капель, водность дождевых капель, ледность кристаллических частиц осадков, суммарная ледность и проч. Данные представлены в виде временных рядов максимальных значений параметров (с шагом 1 мин) и в виде распределений параметров по высоте (с шагом по времени 5 мин и по пространству – 200 м).

Физико-статистическая модель также выводит дополнительный отчет о максимальных значениях основных параметров, времени и высоте их достижения, а также о прогнозе опасных явлений погоды.



Рисунок 3.1 – Схема микрофизических переходов в модели конвективного облака малой размерности (базовая модель конвективного осадкообразующего облака) и трехмерной численной модели конвективного облака [110]. *Примечание:* под градинами далее рассматриваются совместно град и крупа

Модель малой размерности в сравнении с трехмерной моделью конвективного облака (описана в разделе 3.1.2) имеет те преимущества, что она проста в использовании, не требует больших вычислительных мощностей (запускается на персональном компьютере) и проста в интерпретации результатов и обработке данных.

Данная модель использовалась соискателем для получения характеристик конвективных облаков в рамках ансамблевого прогноза грозы (раздел 3.5). Также модель применялась для оценки влияния на прогноз грозовых облаков отклонений в стратификации атмосферы,

полученной с помощью мезомасштабной модели WRF, по сравнению с данными аэрологических наблюдений (раздел 3.4).

3.1.2 Трехмерная нестационарная модель конвективного облака

Трехмерная нестационарная численная модель конвективного облака разрабатывалась рядом научно-исследовательских учреждений Росгидромета (ФГБУ «ЦАО», «НПО «Тайфун», ФГБУ «ВГИ», ФГБУ «ГГО») под руководством Главной геофизической обсерватории им. Воейкова. Эти работы продолжаются и по сей день. В Главной геофизической обсерватории модель активно используется для решения задач исследования пространственного распределения параметров в конвективных облаках, определения характеристик при переходе облака в грозовую стадию и максимальных характеристик облаков при различных условиях, оценки эффекта активных воздействий и проч.

Общие положения

В основе численной модели лежит система гидромеродинамических уравнений, включающая уравнения неразрывности, движения (сохранения количества движения), энергии и переноса массы частиц конденсированной фазы. Она дополнена параметрическим описанием процессов микрофизических переходов (рис. 3.1).

В модели приняты следующие основные допущения:

1. Температура всех компонентов облачной среды одинакова (время температурной релаксации для конденсированной фазы полагается пренебрежимо малым по сравнению с шагом по времени).
2. Давление в газовой фазе равно давлению в жидкой фазе (это справедливо в случае, когда малы эффекты поверхностного натяжения, и характерное время исследуемого макропроцесса во много раз превышает время установления равновесного давления между фазами).
3. Время скоростной релаксации частиц мало, т. е. в момент возникновения они уже двигаются относительно окружающей среды с установившейся скоростью гравитационного падения (берется средневзвешенное значение этой скорости).
4. В облаке при наличии облачных капель среда находится в состоянии термодинамического равновесия, т.е. парциальное давление водяного пара равно давлению насыщения относительно плоской поверхности воды.

Турбулентность учитывается полуэмпирическим способом (К-модель). Считается, что воздух и водяной пар образуют несущую паровоздушную среду, остальные микрофизические фракции являются конденсированными, для каждой фракции записывается уравнение переноса

массы. К системе уравнений добавлены уравнения переноса зарядов. В виде параметрических выражений рассчитываются интенсивности микрофизических процессов, из чего впоследствии получены источники-стоки субстанций. Основные уравнения модели приведены в Приложении Г.

В модели учтены следующие механизмы электризации:

1. Диффузионный;
2. Индукционный;
3. Сложение зарядов частиц разных микрофизических типов при взаимодействии (коагуляции);
4. Изменения величины заряда при микрофизических переходах;
5. Разделение заряда при столкновении частиц (облачных капель и тающих градин, ледяных кристаллов и градин);

Модель записана в декартовой системе координат. Подробное описание модели приведено в работах [110, 111].

Структура модели

Модель имеет блоковую структуру (рис. 3.2):

Гидротермодинамический блок – описывает перенос импульса, энергии, влажного воздуха, капель, ледяных частиц, электрических зарядов;

Микрофизический блок – описывает фазовые переходы частиц, коагуляцию и микрофизические процессы электризации.

Указанные блоки связаны уравнением состояния. Напряженность электрического поля рассчитывается при помощи уравнения Пуассона (используется в обоих блоках).

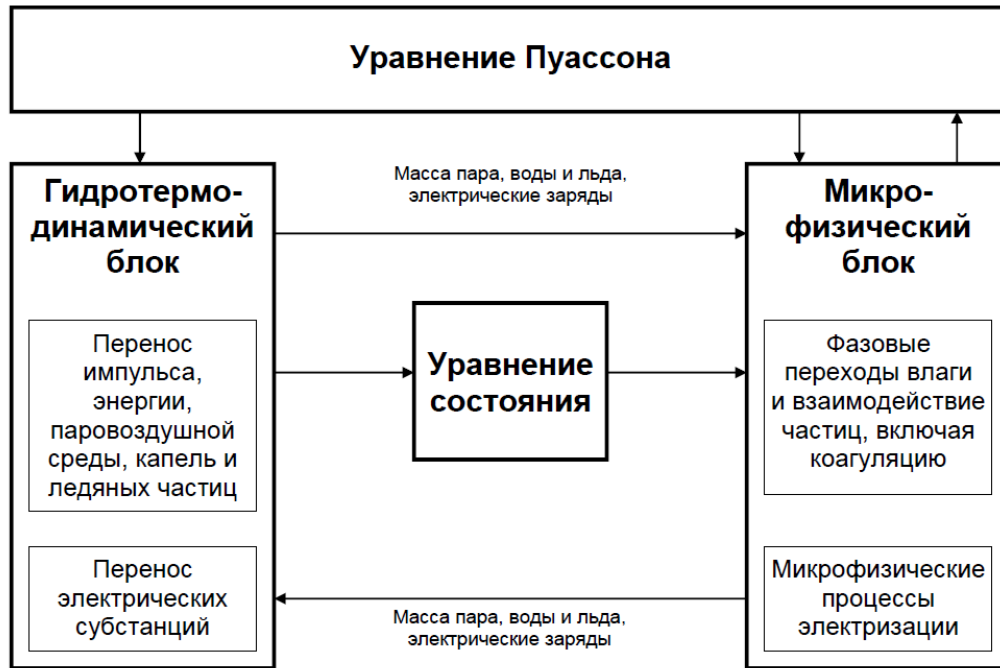


Рисунок 3.2 – Схема обмена данными между блоками модели на каждом шаге по времени [110]

Численные методы

В основе вычислительной реализации разработанной модели лежит принцип разделения решения по физическим процессам (метод расщепления). Данный методологический прием позволяет декомпозировать сложную систему уравнений на отдельные блоки: сначала производится расчет гидротермодинамических характеристик среды (полей скорости, давления и температуры), а затем, на полученной динамической основе, моделируются микрофизические процессы, связанные с фазовыми переходами и эволюцией облачных элементов.

Для интегрирования системы уравнений, описывающей законы сохранения импульса, массы и энергии, применяется явная конечно-разностная схема Маккормака. Эта схема, обладающая вторым порядком аппроксимации как по временной координате, так и по пространственным переменным, обеспечивает необходимую точность при расчете волновых процессов и конвективных движений. В отношении уравнений, описывающих перенос скалярных величин (например, водности или концентрации частиц), используется противопоточная схема, которая позволяет минимизировать численную диффузию и корректно передавать адвекцию даже при наличии резких градиентов. Нахождение поля давления сводится к решению уравнения Пуассона, для чего итерационно применяется метод бисопряженных градиентов, обеспечивающий устойчивую сходимость при решении эллиптических задач.

Пространственная дискретизация задачи осуществляется в прямоугольной области, которая разбивается равномерной сеткой с фиксированными шагами Δx , Δy , Δz по соответствующим направлениям. Выбор шага диктуется масштабом моделируемых явлений: при типичных расчетах конвективных облаков значения пространственного разрешения варьируются в пределах от 100 до 200 метров. Временной шаг Δt является величиной переменной. Модель поддерживает два режима: либо использование заранее заданного постоянного значения (в диапазоне от 0,1 до 1 секунды), либо его автоматическую адаптацию в ходе вычислительного процесса. Во втором случае величина шага динамически подбирается из условия выполнения критерия устойчивости Куранта — Фридрихса — Леви, что гарантирует корректность явных схем при переменных скоростях течения.

Модель реализована на языке программирования Фортран и адаптирована к параллельным расчетам при помощи библиотеки MPI.

Начальные и граничные условия

Начальными данными для расчетов является вертикальное распределения давления, температуры, температуры точки росы, скорости ветра. Начальные условия также включают возмущения поля скорости ветра и (или) температуры.

Начальное распределение параметров электрического состояния атмосферы задается с помощью вертикальных профилей концентрации аэроионов (положительных и отрицательных), которые соответствуют фоновым условиям ясной погоды без облачности. Значения удельного содержания облачных фракций и их суммарный заряд в начальный момент времени принимаются равными нулю.

Нижняя граница расчетной области (соответствует подстилающей поверхности) задается непроницаемой. Боковые границы в зависимости от задачи могут быть заданы как непроницаемые или с условием свободного втекания (вытекания). Последний тип задания боковых границ используется для учета взаимодействия с полем ветра.

Выходные данные модели содержат временные ходы максимальных значений характеристик (высота, верхней границы облака, скорости восходящих/нисходящих потоков, интенсивность дождя, интенсивность града, радиолокационная отражаемость, водность облачных и дождевых капель, ледность градин и облачных кристаллов и проч.) с шагом 1 сек. Также при расчете формируются бинарные файлы с пространственным распределением параметров.

3.1.3 Доработка численных моделей

Трехмерная нестационарная модель конвективного облака не только активно используется в

рамках выполнения бюджетных тем Росгидромета и грантов, но и постоянно дорабатывается. Соискатель принимал участие в доработке модели, что отражено в свидетельстве о регистрации программ для ЭВМ. Так, ряд доработок включал:

- создание новой версии трехмерной модели – «распараллеленной» при помощи технологии MPI и пригодной для запуска на суперкомпьютере [112];
- создание блока обработки и визуализации результатов расчетов, основной функциональной возможностью которого является представление двумерных срезов трехмерных полей данных [113];
- создание программы, реализующей алгоритм моделирования коронных разрядов в трехмерной модели [114];
- создание программы, реализующей подготовку результатов радиозондирования (начальных данных) к выполнению расчетов – преобразование и расчет дополнительных параметров, вписывание в модельную сетку [115];
- создание параметризации процессов электризации с учетом коронных разрядов [116];
- создание программы, позволяющей получать оценочные значения ряда параметров, которые в дальнейшем используются в расчетах [117];
- создание программы, уточняющая расчет скоростей седиментации дождевых капель и градин [118].

Во всех перечисленных выше работах вклад соискателя состоит в выполнении тестовых расчетов и обработке их результатов для оценки эффективности новых компонентов. Соискатель принимал активное участие в разработке и усовершенствовании новых алгоритмов расчетов, о которых говорится выше.

Соискатель принимал непосредственно участие в разработке новых средств визуализации и обработки результатов расчетов. Вклад соискателя в указанных случаях состоял в разработке алгоритма и его программной реализации. Было сделано следующее:

- Разработана программа визуализации результатов трехмерных расчетов на базе программы MATLAB, акты внедрения приведены в Приложении Ж
- Разработана программа постпроцессинга данных - автоматической обработки временного хода экстремальных значений характеристик в расчетной области и их визуализации “Extremum visualizer” [119], акт внедрения приведен в Приложении Ж.

Также в ходе работ по исследованию характеристик конвективных облаков была разработана программа сбора данных аэрологического зондирования атмосферы из открытого банка данных, создания распределений параметров по высоте, извлечения и обобщения характеристик неустойчивости атмосферы “RawinCompile” [120].

3.2 Результаты моделирования развития грозовых облаков

В разделе 3.2 приведены результаты расчетов, выполненные при помощи трехмерной численной нестационарной модели конвективного облака в рамках различных исследований. Проведено моделирование для 9 дней с грозой, для чего суммарно выполнено 30 расчетов. На отдельных примерах выяснено влияние строения атмосферы и следующих процессов на параметры развивающегося кучево-дождевого облака: гетерогенного замерзания капель, аэрозольного загрязнения атмосферы, активных воздействий льдообразующим реагентом.

3.2.1 Динамика пространственного распределения зарядов и напряженности электрического поля в облаке и вне него (29 мая 2012 г., Пятигорск)

29 мая 2012 г. в районе г. Пятигорска (Северный Кавказ) наблюдалось развитие мощной грозо-градовой ячейки, из которой выпал град диаметром 2-3 см, его слой достигал 20 см.

Моделируемое облако появляется в расчетной области на 14 мин расчета, далее время отсчитывается от момента появления облака. Скорость восходящих потоков за все время развития облака достигает 20,6 м/с (22 мин), максимальная высота верхней границы составляла 9,9 км (33 мин). Радиолокационная отражаемость в облаке достигала 57,3 dBZ. Наибольшая интенсивность выпадения дождя была равна 268 мм/ч (27 мин), града – 40 мм/ч (28 мин).

Была проанализирована зарядовая структура облака на различных стадиях электризации: начальный этап развития (13 мин), организованная электризация облака (17 мин), начало грозовой активности (18 мин), период грозовой активности (на стадии аккумуляции заряда) (23 мин). Строение облака в указанные моменты времени представлено на рис. 3.3.

На начальном этапе электризации (13 мин) представлено облако, верхняя граница которого достигла температуры $-5,8^{\circ}\text{C}$ (3,9 км), но при этом ледяные частицы в облаке отсутствовали. Дождевые капли в этот момент испарялись, не достигая подстилающей поверхности. Скорость восходящего потока достигала 9,0 м/с. Положительный заряд на этом этапе располагается в верхней части облака, отрицательный – в нижней, что соответствует нормальной полярности. Плотность объемного заряда τ менялась от -14 до 11 пКл/м³, при этом отрицательный заряд (с малыми абсолютными значениями плотности) наблюдался и под нижней границей облака. Вертикальный профиль составляющей напряженности электрического поля (E_z) демонстрирует, что в центральной части облака наблюдались повышенные значения напряженности (максимум был равен 554 В/м). Непосредственно под облаком также наблюдались положительные величины E_z .

Облако на 17 мин развития (также представленное на рис. 3.3) находилось на стадии организованной электризации. Критерием перехода в эту стадию является наличие возмущений

E_z над верхней границей облака с абсолютными значениями более 100 В/м. Максимальная скорость восходящего потока была равна 14,2 м/с. Верхняя граница облака в представленный момент достигала высоты 5,5 км, что соответствовало температуре $-15,7^{\circ}\text{C}$ в невозмущенной атмосфере. В облаке присутствовали ледяные частицы. Значения E_z над облаком достигали -823 В/м. Объемная плотность заряда возросла, ее значения изменялись от -680 до 510 пКл/м³.

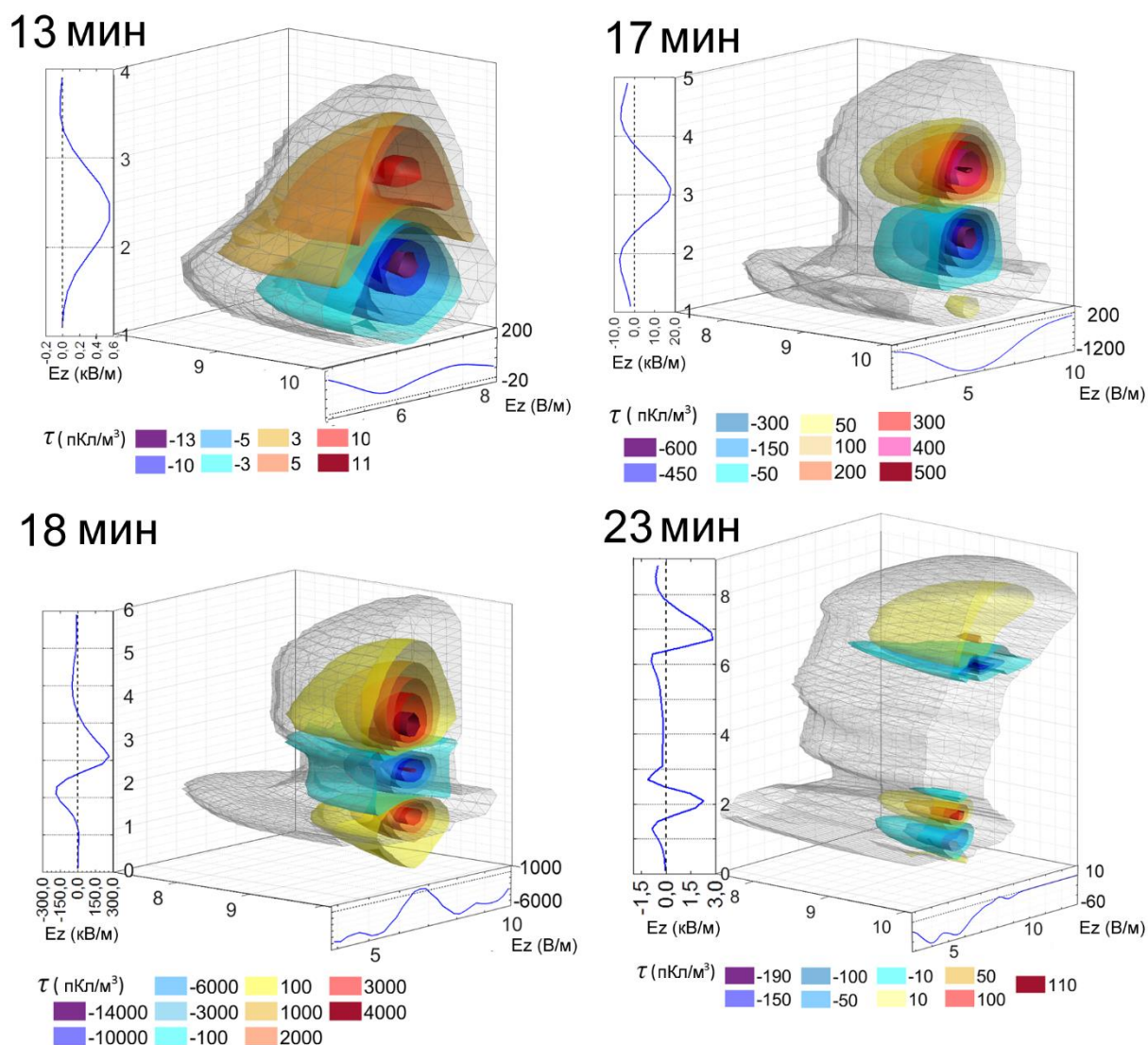


Рисунок 3.3 – Зарядовая структура облака (29 мая 2012 г., Северный Кавказ) на различных этапах электризации: области положительного и отрицательного заряда (цветные изоповерхности), вертикальный профиль напряженности электрического поля (панель слева) и приземный профиль напряженности электрического поля (панель снизу) для сечения облака по центральной оси [111]

Напряженность электрического поля на 17 мин имела как положительные, так и

отрицательные значения. Положительные значения располагались в центральной части облака, достигая максимума – 18 кВ/м. Отрицательные значения отмечались в верхней и нижней части облака, они достигали –7 кВ/м. Возмущение напряженности электрического поля над облаком распространялось на высоту до 1,5 км над его верхней границей.

К 18 мин в облако перешло в грозовую стадию (выбран момент времени вблизи начала грозовой активности), температура на уровне верхней границы облака составляла $-31,6^{\circ}\text{C}$. Зарядовая структура облака на этом этапе представлена положительным зарядом в верхней половине облака и его нижней четверти, между этими областями расположен отрицательный заряд, абсолютные значения объемной плотности которого по крайней мере в 3 раза превосходят значения положительного заряда. Формируется соответствующая структура напряженности электрического поля, максимальные положительные значения которой равны 267 кВ/м, отрицательные – -188 кВ/м. Оба экстремума E_z расположены в нижней половине облака, положительный расположен вблизи высоты 2,5 км, отрицательный – около 1,5 км. Значения E_z выше уровня 3,5 км отрицательны, возмущения E_z над облаком на 3 км превышают его верхнюю границу.

После начала грозовой активности (23 мин), в силу того, что облако продолжает активно развиваться по вертикали, формируется многослойная зарядовая структура с двумя областями наибольших значений объемной плотности заряда: в верхней части облака (слой положительного и отрицательного заряда, сверху – вниз соответственно) и в нижней его части (отрицательный, положительный и снова отрицательно заряженные области). Такой диспозиции заряда в облаке соответствует и вертикальное распределение E_z . В то время как под облаком напряженность электрического поля имеет отрицательный знак.

Рассмотренная динамика расположения областей заряда различного знака и величины в облаке, а также вертикальные профили напряженности электрического поля позволяют заключить, что высота формирования электрических разрядов (высота, на которой достигаются максимальные значения E_z) увеличивается на стадии развития облака, а при переходе облака в стадию зрелости – стационарируется вблизи изотермы $-22,0^{\circ}\text{C}$.

Исследованная динамика изменения E_z в облаке и вне него (над верхней границей и у подстилающей поверхности) позволяет выявить большие различия в экстремумах этих величин. Были рассчитаны коэффициенты корреляции для временных рядов экстремумов E_z . Коэффициент корреляции между абсолютными величинами положительных и отрицательных экстремумов был равен 0,59. Коэффициент корреляции между экстремумами напряженности под облаком и внутри него составил 0,94. Аналогично, коэффициент корреляции между напряженностью над облаком и внутри него был равен 0,80. Для сравнения результатов было

выполнено исследование формирования грозового облака в Китае, где была получена инвертированная структура заряда на начальном этапе электризации и более сложная структура на зрелой стадии [111]. Результаты исследования значений напряженности электрического поля внутри облака, над ним и у поверхности земли показали, что сильные корреляционные связи обнаруживаются только при подробно рассмотренной выше достаточно простой зарядовой структуре, отвечающей традиционным представлениям о трехслойной структуре заряда в облаке.

Результаты расчетов электрических характеристик верифицированы по данным натуральных (летних) исследований, проанализированных в рамках выполнения хоз. договора (при участии соискателя) – акт внедрения приведен в Приложении Ж.

3.2.2 Влияние аэрозольного загрязнения на характеристики облаков (11 августа 2017 г., Пекин)

11 августа 2017 г. в окрестностях Пекина (Китай) наблюдалось формирование грозовых облаков, образующих линию шквала и дающих сильные осадки. Наблюдение за загрязнением атмосферы показало повышенный аэрозольный фон. Были выполнены несколько серий расчетов с целью исследования влияния аэрозольного загрязнения на характеристики облаков, результаты опубликованы в работе [121].

Для учета аэрозольного загрязнения варьировались микрофизические параметры. Так, в используемой в модели параметризации Кесслера (переход облачных капель в дождевые) варьировался параметр $q_{с\ крит}$ - критическое значение водности облачных капель, при котором начинается автоконверсия. Полагается, что при сдвиге спектра распределения облачных капель по размерам влево (при уменьшении диаметра капель) $q_{с\ крит}$ будет повышаться. Также варьировались параметры распределения дождевых капель и градин по размерам, определяемые функцией распределения Маршалла – Пальмера - N_{0r} и N_{0i} (пояснение и значения параметров приведены в Приложении Д). Таким образом, варьированием параметров $q_{с\ крит}$, N_{0r} , N_{0i} в расчетах задавалось аэрозольное загрязнение.

Расчеты показали формирование облака с высотой верхней границы, достигавшей 16,9 км, и максимальной скоростью восходящего потока 53,9 м/с. При этом нижняя граница облака располагалась достаточно высоко (2,5 км) и подоблачный слой характеризовался низкой влажностью, что в целом способствовало испарению выпадающих осадков и уменьшению их интенсивности на подстилающей поверхности. Так, несмотря на высокое содержание градин, интенсивность их выпадения составила менее 1 мм/ч.

Изменение порога автоконверсии практически не оказало влияния на развитие облака, что является неожиданным результатом. Вероятно, это объясняется тем, что большая часть облака находится в области отрицательных температур и основные механизмы осадкообразования связаны с твердой фазой (таяние градин), в то время как автоконверсия играет второстепенную роль. При $q_{с\ крит} \rho_a > 2,5 \text{ г/см}^3$ удельное значения облачных капель более не достигает указанного порогового значения, что приводит к отключению этого механизма.

Полученные максимальные значения параметров облака при варьировании параметров Маршала-Пальмера приведены в Приложении Д. Показано, что смещение спектра капель по размерам в сторону уменьшения (увеличение параметра N_{0r}) приводит к увеличению водности как дождевых капель, так и градин, при этом они накапливаются в облаке, а интенсивность их выпадения (вследствие малых размеров) уменьшается. Смещение спектра распределения градин в сторону уменьшения (увеличение параметра N_{0i}) приводит к ослаблению осадкообразования в целом и также к уменьшению выпадения всех видов осадков (изоповрхности ледности градин для различных значений N_{0i} приведены на рис. 3.4). Это, в свою очередь, замедляет процесс диссипации облака, поэтому продолжается рост его вершины и усиление восходящих потоков.

Таким образом по результатам расчетов показано, что в условиях высокой нижней границы и малой влажности подоблачного слоя жидкокапельная влага не играет определяющей роли в процессах осадкообразования, поэтому варьирование параметров, связанных с дождевыми каплями, не оказало значительного влияния на развитие облака. В то же время варьирование параметров градин, которые играли большую роль в развитии облака, при сдвиге спектра их распределения в сторону уменьшения приводит к значительному уменьшению осадков на поверхности земли и увеличению времени жизни облака и прочих его характеристик.

Таким образом показано, что при сильном аэрозольном загрязнении атмосферы, приводящем к уменьшению размеров ледяных частиц, наблюдаются значительные изменения в динамике эволюции облака, его микрофизических характеристиках и электрическом состоянии. В частности, уменьшается количество выпадающих осадков и увеличивается время жизни облака, за счет чего молниевая активность не претерпевает значительных изменений.

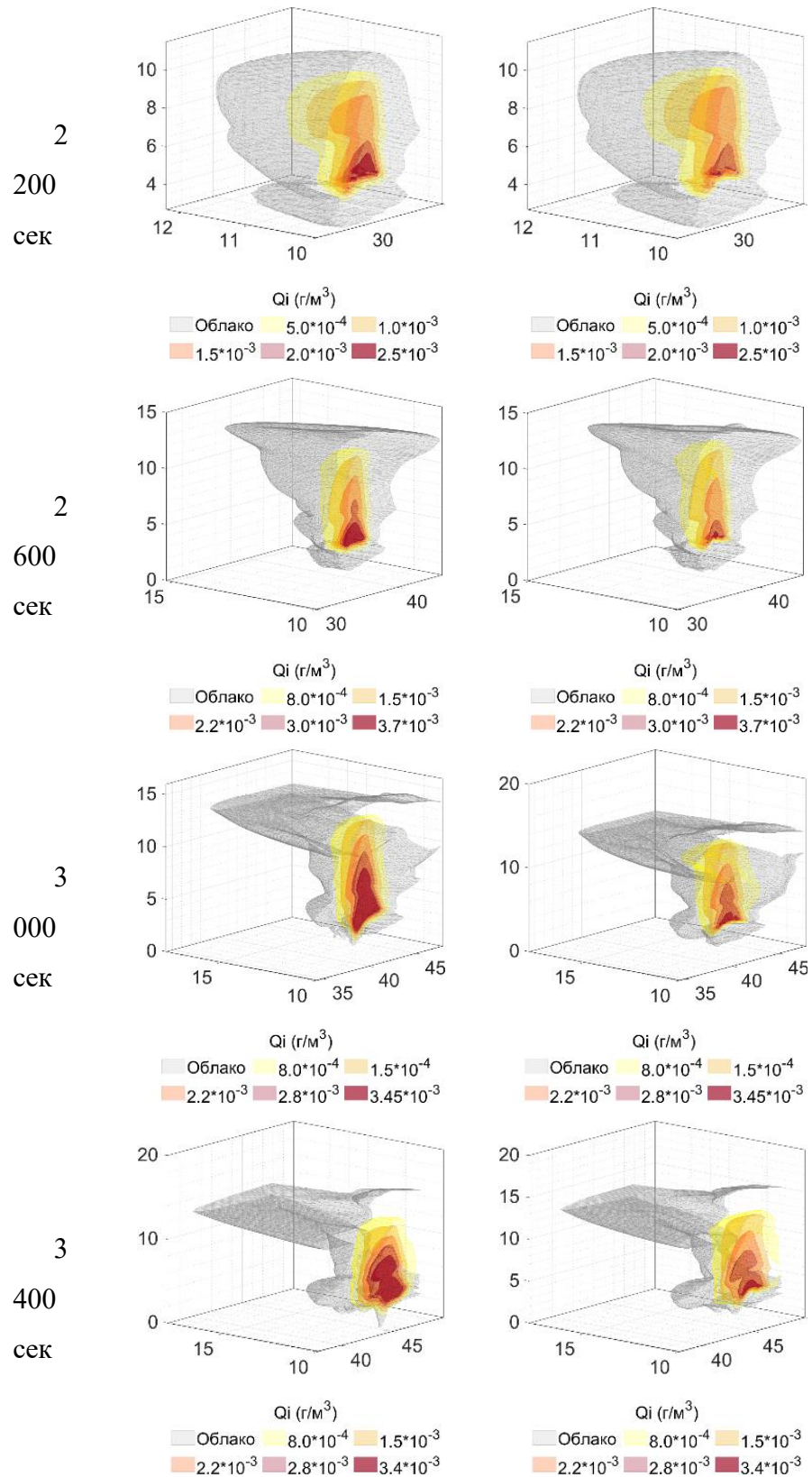


Рисунок 3.4 – Изоповерхности ледности градин (г/м³) для $N_{0i} = 0,006 \text{ см}^{-4}$ (слева) и $N_{0i} = 0,06 \text{ см}^{-4}$ (справа) [121]

3.2.3 Влияние гетерогенного замерзания капель на характеристики облаков (22 июля 2017 г., Санкт-Петербург)

22 июля 2017 г. в Санкт-Петербурге наблюдалось развитие мощного грозо-градового конвективного облака, сопровождавшееся выпадением слоя града, что крайне редко наблюдается в данном физико-географическом регионе. Для атмосферных условий, наблюдавшихся в этот день, было выполнено два численных расчета. Целью расчетов было исследование влияния гетерогенного замерзания капель на характеристики облаков. Таким образом, в одном из расчетов не был учтен механизм гетерогенного замерзания (учтен только гомогенный механизм) (А), в то время как во втором – был учтен (Б). Результаты опубликованы в работе [122].

Расчеты показали, что максимальная высота верхней границы облака незначительно увеличилась и составила 11,5 км (А) и 11,6 км (Б). Аналогично изменилась максимальная скорость восходящего потока: 37,6 и 38,0 м/с (расчеты А и Б соответственно). Из всех облачных фракций наиболее существенный рост максимального значения наблюдался для водности облачных капель (Q_c), она была равна 3,2 г/м³ (А) и 3,7 г/м³ (Б). водность дождевых капель (Q_r) и ледность облачных кристаллов (Q_{ic}) увеличились незначительно, из значения составляли: 12,7 и 12,8 г/м³ (Q_r), 1,5 и 1,7 г/м³ (Q_{ic}). Ледность градин (Q_i), наоборот слегка уменьшилась при учете гетерогенного замерзания капель, с 13,9 до 13,8 г/м³.

Максимальная радиолокационная отражаемость в облаке не показала изменений. В то время как интенсивность дождя у подстилающей поверхности незначительно возросла: с 351 до 355 мм/ч. Более значительным оказалось увеличение интенсивности выпадения града, максимумы составили 351 мм/ч (А) и 375 мм/ч (Б). Таким образом, подтверждается ранее выполненные исследования при помощи модели малой размерности, что гетерогенное замерзание капель приводит к усилению осадкообразования. Это можно объяснить усиленным льдообразованием в области сравнительно высоких температур, что способствует замораживанию дождевых капель (за счет коагуляции с кристаллами). Далее, вероятно, происходит каскадное замерзание облака, которые активно взаимодействуют с другими облачными частицами, быстро растут и выпадают на подстилающую поверхность. В Приложении Е приведены изображения изоповерхностей облачных фракций в различные моменты времени.

Исследование электрических характеристик облака показало, что в двух выполненных расчетах облако переходит в грозовую стадию с одной и той же скоростью, время перехода составляет около 15 мин с момента появления первых облачных капель. При этом в случае Б наблюдается бóльшая интенсивность молниевых разрядов, что говорит о роли льдообразования

в процессах электризации облака. Также рассмотрена зарядовая структура облака перед началом разрядов: показано (Приложение Е), что при учете гетерогенного замерзания капель происходит формирование инвертированной структуры зарядов. Предполагается, что основным механизмом электризации в данном случае является не поляризационный, а «лед-лед», он приводит к тому, что облачные капли заряжаются отрицательно и поднимаются вверх.

Таким образом, по результатам численного моделирования показано влияние гетерогенного замерзания капель, проявившееся в увеличении процесса осадкообразования в облаке, более интенсивной электризации облака и разделении зарядов. Также показано, что учет гетерогенного замерзания капель может приводит к формирования инвертированной зарядовой структуры. В то же время не обнаружено сильного влияния на динамические и микрофизические характеристики облака.

3.2.4 Пространственное распределение восходящих (нисходящих) потоков в облаке и плотности объемного заряда (18-19 июня 2020 г., Санкт-Петербург)

Рассмотрено распределение в облаке областей восходящих и нисходящих потоков и зарядовая структура по результатам трехмерного численного моделирования на примере грозового облака, развивавшегося вблизи Санкт-Петербурга (возле пос. Роцино вблизи побережья Финского залива) в ночь с 18 на 19 июня 2020 г. [123].

По результатам радиолокационных измерений максимальная радиолокационная отражаемость в облаке достигала 61 dBZ; облако проникло в тропопаузу, максимальная высота его верхней границы была равна 12,5 км. Численное моделирование показало развитие облака с наибольшим значением высоты верхней границы 10,2 км, вертикальная мощность которого превышала 8 км. Скорость восходящих потоков достигала 24,3 м/с.

Облако перешло в грозовую стадию на 17 мин развития. В этот период высота его верхней границы составляла 7,8 км, вертикальная мощность – 6,6 км, а максимальная скорость восходящих потоков – 18,4 м/с. Из облака выпадали слабые осадки, их интенсивность не превышала 3 мм/ч. Восходящие потоки W занимали практически все облако, концентрируясь в его наветренной части (рис. 3.5). Абсолютный максимум W располагался вблизи изотермы -15°C . Зарядовая структура облака отличалась от классической: экстремум отрицательного заряда в несколько раз превышал по величине экстремум положительного заряда в верхней части облака. При этом отрицательный заряд занимал относительно небольшой по мощности слой, а слой положительного заряда в нижней части облака занимал до 3 км. Рассмотренные величины заряда отдельных облачных фракций показали, что основным носителем отрицательного заряда являлись градины (абсолютный максимум заряда располагался на

высоте 5,7 км, что соответствует температуре $-15,9^{\circ}\text{C}$).

На 19 мин в облаке активно формировались грозовые разряды. Высота верхней границы при этом составляла 8,3 км ($-36,0^{\circ}\text{C}$), осадки также имели небольшую интенсивность (9,6 мм/ч). Преобладающая часть облака на этом этапе занята восходящими потоками (их максимальная скорость достигает 16,4 м/с), однако уже начинают формироваться области нисходящих движений: в нижней части облака и подоблачном слое (очевидно, нисходящие движения, связанные с выпадением осадков), перед фронтальной частью облака и в наковальне.

Зарядовая структура облака на 19 мин сохранялась прежней. Дождевые капли и градины (области наибольшего их содержания) смещаются в нижнюю часть облака, что говорит о формировании осадков, максимальная интенсивность которых составит 72,5 мм/ч на 22 мин развития облака.

В выбранный момент периода диссипации (27 мин развития облака) высота верхней границы облака составляла 9,9 км. Интенсивность осадков к этому моменту уже достигла максимума и уменьшалась, составляя 24,2 мм/ч. Заметно уменьшилась область, занятая восходящими потоками, хотя их скорость все еще достигала значений 13 м/с. Значительно увеличилась область нисходящих движений в подоблачном слое, максимальное значение их скорости составило 12 м/с. Сильно уменьшились области со значениями плотности объемного заряда, составляющими более 30% от экстремального значения (выделены на рис. 3.5 как области положительного и отрицательного заряда), сместившись в нижнюю часть облака и подоблачный слой.

Результаты расчетов демонстрируют, что переход облака в грозовую стадию был обусловлен наличием сильного восходящего потока воздуха, занимавшего практически весь объем облака вплоть до его диссипации. Наиболее интенсивные нисходящие потоки воздуха связаны с выпадением осадков. Максимальные скорости восходящего потока на начальной стадии и стадии развитого облака наблюдались вблизи изотермы -15°C , преимущественно в наветренной части облака. На стадии диссипации, когда нижняя часть облака была практически полностью «вымыта» осадками и подоблачный слой занимали нисходящие потоки, восходящие потоки все еще сохранялись в верхней части облака, достигая величин, близким к скорости нисходящих потоков.

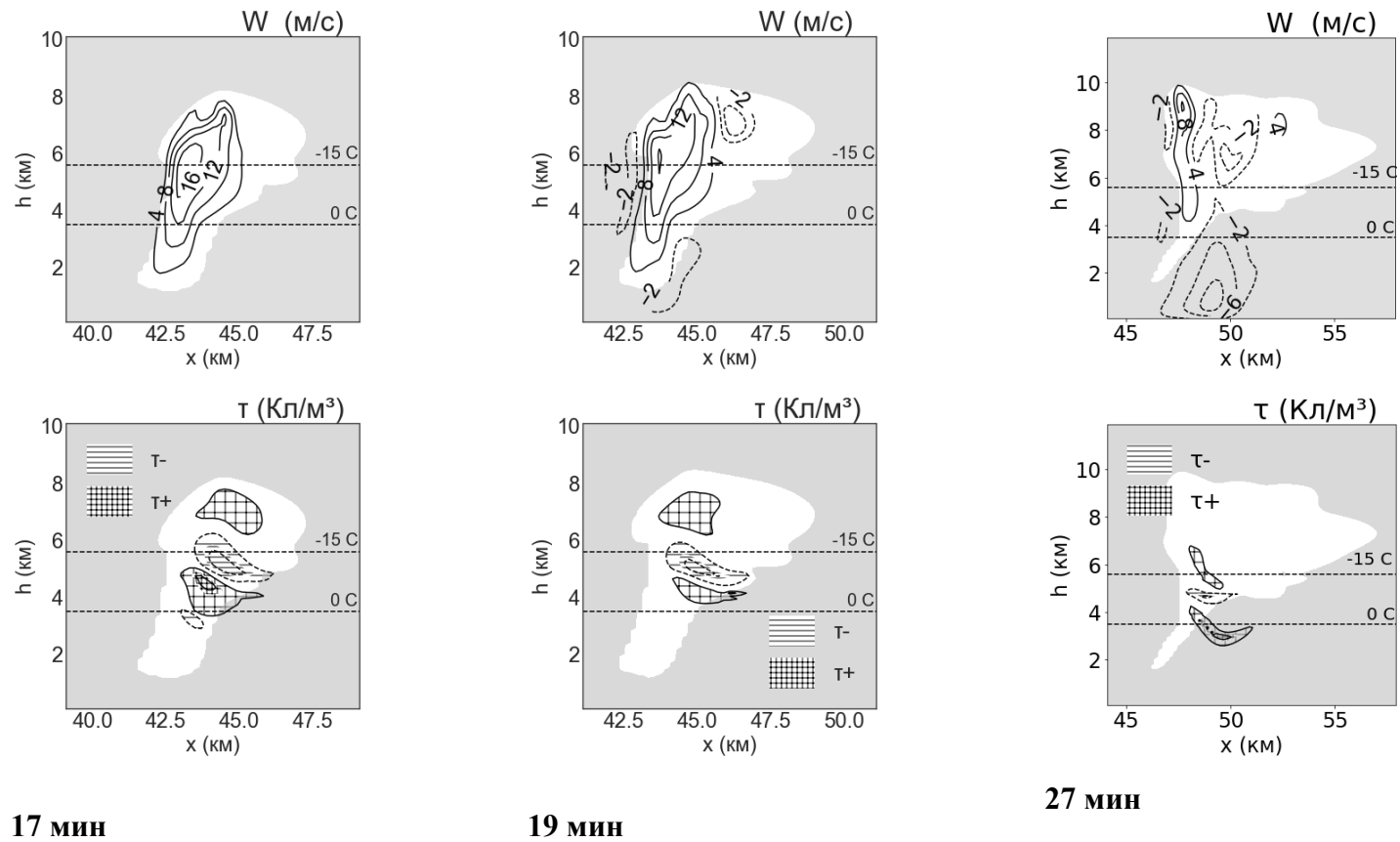


Рисунок 3.5 – Изолинии скорости восходящих (положительные значения) и нисходящих (отрицательные значения) потоков в облаке (левый столбец, W) и области наибольшего значения объемной плотности заряда в облаке (τ) в момент начала электрических разрядов (17 мин), в период наибольшей их интенсивности (19 мин) и на этапе диссипации облака (27 мин) [123]

3.2.5 Оценка физического эффекта воздействий льдообразующим реагентом (14 мая 2012 г., Северный Кавказ)

За основу исследования выбран случай развития грозовой ячейки на Кавказе 14 мая 2012 г. На указанную ячейку воздействовали кристаллизующим реагентом (Ставропольская военизированная служба Росгидромета) с целью предотвращения выпадения града. По результатам натурных наблюдений верхняя граница облака достигала высоты 10,8 км, а интенсивность выпадения осадков составляла 170 мм/ч. Воздействие на облако производилось дважды, после начала воздействий ряд контролируемых параметров продолжил увеличиваться (высота верхней границы, интенсивность осадков, переохлажденные объемы облака с высокими значениями радиолокационной отражаемости, собственно максимальная радиолокационная отражаемость, вертикально интегрированная водность и др.). Некоторые из перечисленных параметров уменьшились лишь через некоторое время после окончания воздействий.

При помощи модели было выполнено два расчета: естественное развитие облака и облако, на которое выполнялось воздействие. Воздействие моделируется путем замораживания некоторой доли облачных и дождевых капель в заданном слое.

Результаты расчетов показывают, что высота верхней границы облака слабо реагирует на воздействия (максимальное значение составило 10,5 км при естественном развитии и 10,3 км в случае АВ), также как и максимальная скорость восходящего потока (19,1 и 18,8 м/с соответственно).

Микрофизические характеристики облака демонстрируют 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 значения водности облачных, дождевых капель и ледности градин в случае АВ уменьшаются.

На рис. 3.6 продемонстрировано пространственное распределение областей наибольшего содержания гидрометеоров и плотности объемного заряда перед началом разрядов. При воздействиях увеличивается частота электрических зарядов. Формирование инвертированной структуры заряда в расчете с активными воздействиями объясняется повышенным содержанием облачных ледяных кристаллов, выносимых восходящими потоками в вершину облака. Также в случае воздействий отмечается более ранний переход 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 заняла преимущественно облачными кристаллами, а область наибольшего содержания облачных капель смещается ниже.

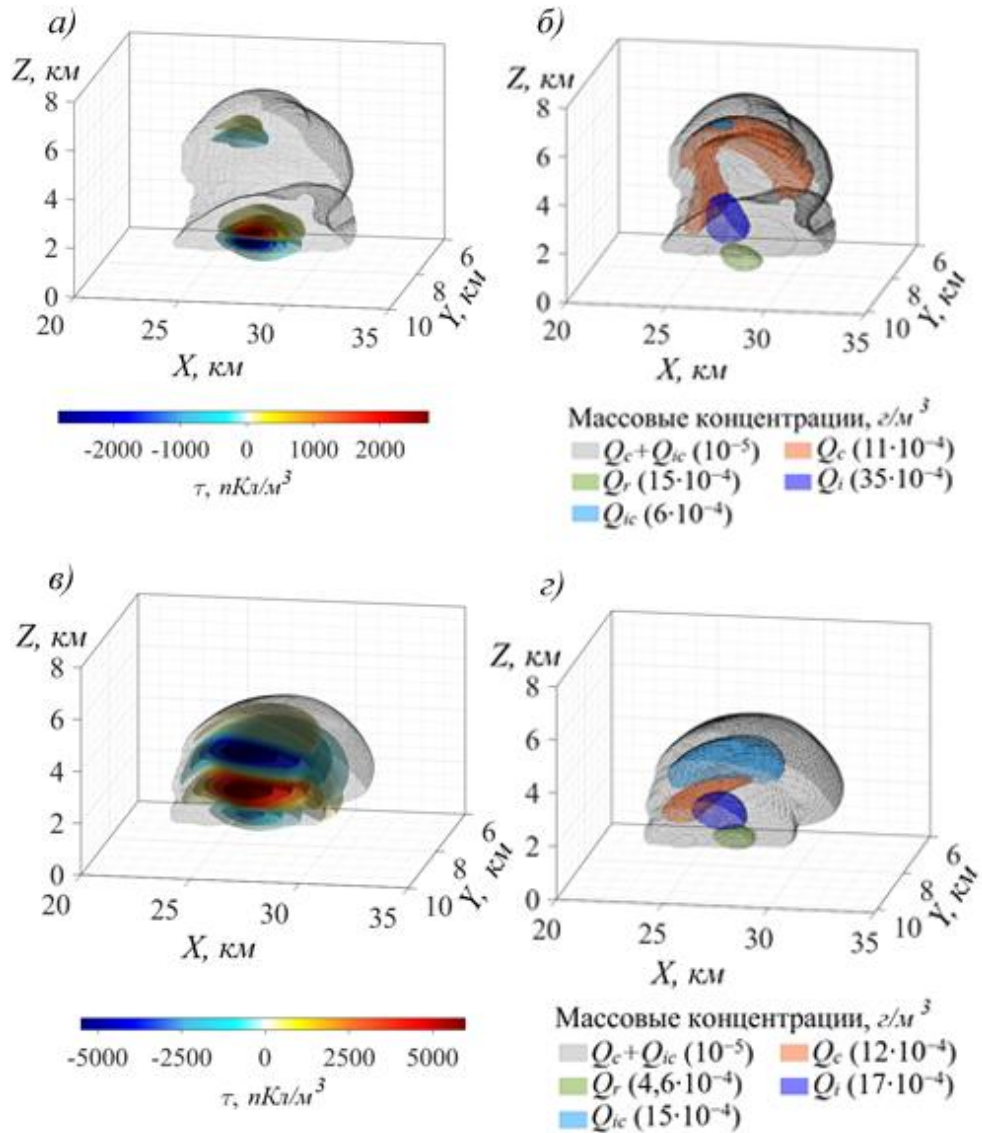


Рисунок 3.6 – Пространственное распределение объемной плотности электрического заряда (слева) и удельного содержания фракций (справа) перед первым молниевым разрядом (а – естественное развитие облака, б – облако с АВ). Q_c , Q_r , Q_i , Q_{ic} – удельное содержание облачных капель, дождевых капель, градин и облачных ледяных кристаллов соответственно.

3.2.6 Учет возмущений температуры внутри облака при выполнении активных воздействий льдообразующим реагентом (1 мая 2021 г., Северный Кавказ)

Исследован учет влияния возмущений температуры внутри облака на эффективность воздействий [124]. Предложена уточненная методика воздействий кристаллизующим

реагентом, отличающаяся тем, что слой внесения реагента определяется не по температуре в невозмущенной атмосфере, а с учетом возмущений поля температуры внутри облака. Как известно, в конвективных облаках температура выше, чем в окружающей атмосфере: оценки показывают, что «перегрев» облака может достигать 10°C [125]. Таким образом, слой, в котором чувствительный к температуре кристаллизующий реагент (AgI) будет действовать наиболее эффективно, должен располагаться выше задаваемого по данным аэрологического зондирования.

Было выполнено численное моделирование конвективной ячейки, на которое осуществлялось воздействие. Проведена серия из трех экспериментов: естественное развитие облака, воздействие на актуальной методике (АВ1, слой внесения реагента задается в соответствии с температурой окружающей среды) и по предлагаемой новой методике (АВ2, слой внесения реагента определяется температурой внутри облака).

Воздействие на облако моделировалось с 50 по 60 мин расчета. Время начала воздействий было выбрано таким образом, чтобы верхняя граница облака достигла изотермы -10°C . В АВ1 воздействие задавалось в слое 3,6...4,0 км ($-6...-10^{\circ}\text{C}$). Анализ поля температуры внутри облака в момент начала воздействий (разность температур между облаком и окружением на каждой модельной уровне, рис. 3.7) показал, что наибольший перегрев составил $3,9^{\circ}\text{C}$ на высоте 3,3 км ($-0,9^{\circ}\text{C}$). В целом наибольшие разности температур между облаком и окружением наблюдались в зоне температура $0...-6^{\circ}\text{C}$. Предполагается, что при интенсивном протекании облакообразующих процессов перегрев распространяется и в области более низких температур.

В АВ2 слой воздействия моделировалось в тот же временной промежуток, однако слой внесения реагента задавался высотами 4,1...4,5 км.

Результаты анализа временных ходов основных характеристик облаков показал, что такие параметры как максимальная высота верхней границы, максимальная скорость восходящего потока, максимальная радиолокационная отражаемость в облаке слабо реагируют на воздействия (и АВ1, и АВ2) – также как и удельное содержание облачных капель. Наблюдаются изменения в динамике водности градин и дождевых капель, однако достигаемые максимальные значения в итоге также меняются мало. Так, при начале воздействий, резко увеличивается ледность облачных кристаллов. При АВ1 уменьшается величина экстремума ледности градин во время воздействий, однако увеличивается величина вторичного экстремума, возникающего после окончания воздействий. При АВ2 величина первичного экстремума больше, однако вторичного – меньше, по сравнению с традиционной методикой задания слоя АВ. Похожим образом ведет себя интенсивность выпадения града: в методике АВ2 по

сравнению с АВ1 после начала воздействий наблюдается кратковременное увеличение интенсивности, одна последующие экстремумы уменьшаются по величине.

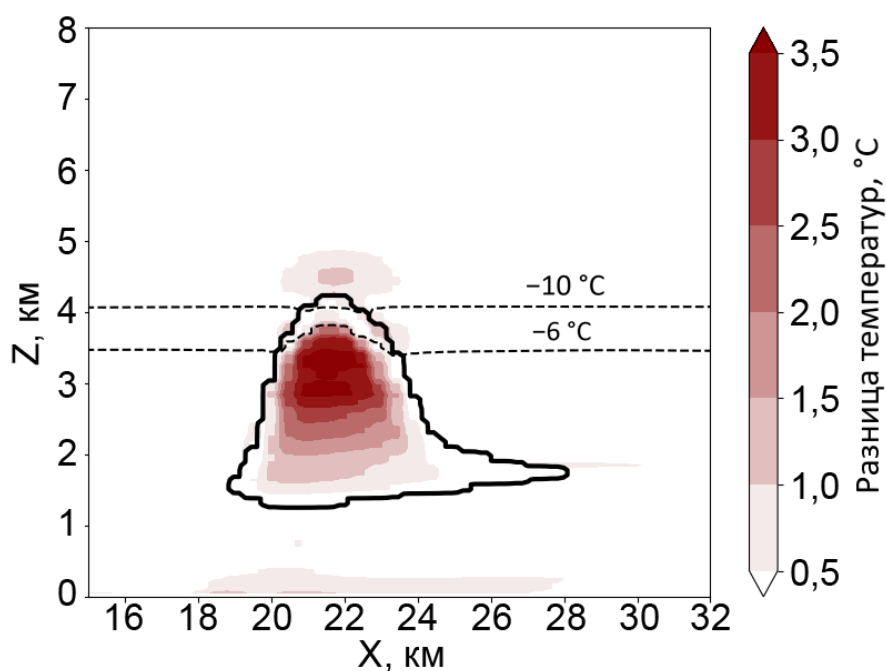


Рисунок 3.7 – Разница температуры в облаке и невозмущенной атмосфере на момент начала активных воздействий (50 мин) [124]

Анализ результатов расчетов по трехмерной модели позволил выделить следующие показатели эффективности предлагаемой методики воздействий на облака (с использованием уточненной высоты слоя воздействий): уменьшилась (незначительно) максимальная интенсивность выпадения града (с 94,1 до 91,1 мм/ч); уменьшился максимум суммарного количества града, выпавшего на единицу площади (с 17,1 до 16,7 мм); в период наиболее интенсивного выпадения града уменьшилась площадь с интенсивностью выпадения града более 5 мм/ч (с 6,12 до 5,96 км²). Результаты позволяют заключить, что такой подход может быть перспективным, предполагается, что он покажет более высокую эффективность при больших значениях перегрева в облаке (относительно окружающей среды).

3.3 Характеристики облаков, переходящих в грозовую стадию

В данном разделе приводятся результаты обобщения расчетов, выполненных с использованием трехмерной численной нестационарной модели конвективного облака для различных регионов, различного температурно-влажностного строения атмосферы и учитываемых в модели физических процессах. Во всех расчетах воспроизводится развитие кучево-дождевого облака, переходящего в грозовую стадию, т.е. в период времени перед началом электрических разрядов. Выполнен детальный анализ результатов моделирования, получены статистические характеристики основных динамических, микрофизических параметров облаков.

В отдельных случаях, по данным наблюдений, развитие грозовых облаков сопровождалось и другими опасными явлениями погоды. Подробные результаты расчетов опубликованы и кратко описаны в разделе 3.2. При написании настоящего раздела использовались материалы статьи, опубликованной соискателем [126].

Расчеты выполнялись для 6 случаев развития грозовых облаков в трех различных регионах, детали приведены в табл. 3.1. Развитие конвективных облаков сопровождалось другими опасными явлениями: градом (29 мая 2012 г., Северный Кавказ и 22 июля 2017 г., Северо-Запад РФ), водяным смерчем (12 августа 2018 г., Северо-Запад РФ). Кроме того, в выборку включен случай развития суперячейкового облака (19 августа 2015 г., Северный Кавказ) и формирование грозового облака в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы (11 августа 2017 г.). Для некоторых из выбранных случаев выполнялось несколько расчетов, общее их количество - 10. В расчетах варьировались учитываемые в модели физические процессы: гетерогенное замерзание капель и формирование коронных разрядов. Сокращенные наименования анализируемых расчетов и учитываемые процессы также приведены в табл. 3.1. Расчеты формирования грозового облака в повышенного фонового содержания аэрозоля в Китае (СН12 и СН13) также отличаются параметрами распределения осадков по размерам (функции Маршалла–Пальмера).

Во всех расчетах были исследованы характеристики облаков на момент перехода в грозовую стадию (начала разрядов). Были рассмотрены следующие параметры: время перехода в грозовую стадию, высота верхней границы облака, максимальная скорость восходящего потока, суммарная интенсивность осадков, максимальная радиолокационная отражаемость, объемы переохлажденной части облака с отражаемостью более 35-60 dBZ, максимальная водность и ледность частиц: облачных и дождевых капель, мелких ледяных кристаллов и градин.

Характеристики облаков на момент начала разрядов приведены на рис. 3.8. и в табл. 3.2.

Время перехода облака в грозовую стадию (отсчитывалось с момента появления облака в расчетной области) варьировалось от 13 мин (САУ3) до 25 мин (СН1), медиана составила 18,7 мин. Наименьшее время, потребовавшееся для начала разрядов, зафиксировано в случае моделирования развития суперячейки на Северном Кавказе, что хорошо согласуется с представлениями о том, что в суперячейковых облаках все процессы протекают с большой интенсивностью.

Высота верхней границы облаков (H_{top}) во время первого разряда составила 5,3 – 13,1 км. Самое низкое положение H_{top} отмечено для расчета NW3 (Северо-Запад РФ), отличительной чертой которого являлся учет коронных разрядов в облаке. Наиболее высокое положение H_{top} получено в расчете СН3 (Китай) с повышенным содержанием аэрозоля и измененными параметрами распределения капель по размерам. Медиана высоты верхней границы была равна 6,6 км.

Максимальная скорость восходящего потока в облаке (W) на момент перехода в грозовую стадию изменялась от 14 до 48 м/с. Наибольшие значения также соответствуют расчету СН3, в то время как наименьшие были получены для Северо-Запада РФ (NW2), при отключенных механизмах гетерогенного замерзания капель и коронирования. Медиана W составила 21 м/с.

Максимальная отражаемость в облаке (Z_{max}) имела медианное значение 61,1 dBZ. Ее значение в отдельных расчетах составило от 51,4 до 64,1 dBZ. Наименьшие значения соответствовали расчету СН3, а наибольшие – NW1` (Северо-Запад РФ).

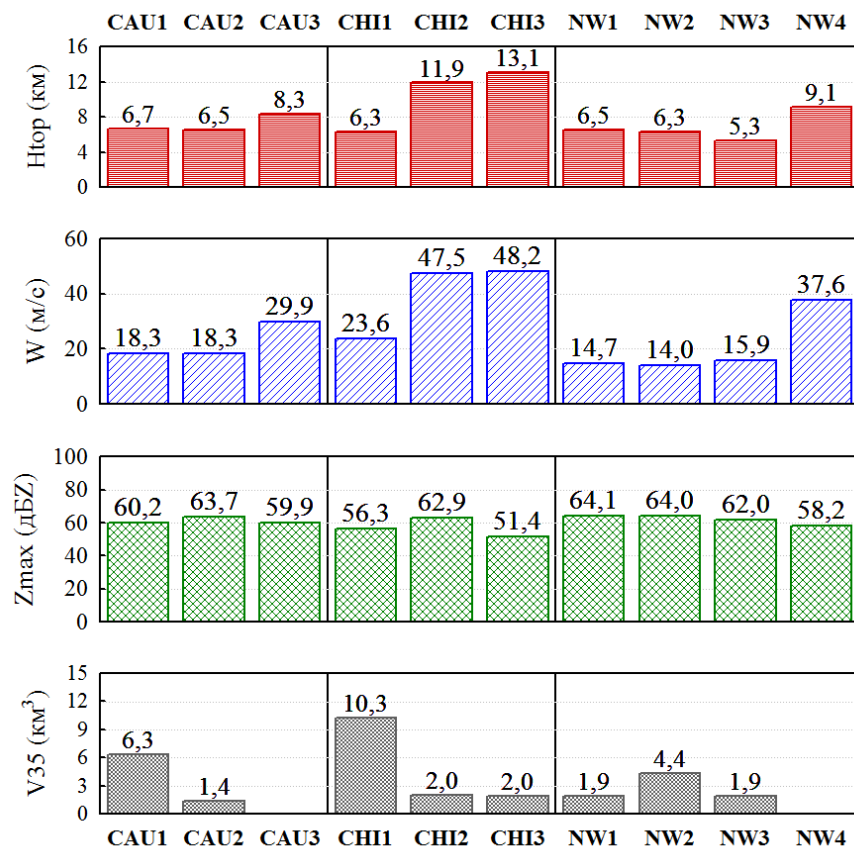


Рисунок 3.8 – Характеристики облаков при переходе в грозовую стадию: максимальная высота верхней границы (H_{top}), максимальная вертикальная скорость (W), максимальная радиолокационная отражаемость (Z_{max}), объем переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБЗ (V_{35})

Таблица 3.1 – Краткие сведения о выбранных случаях развития грозовых облаков и анализируемых расчетах

Дата	Регион	Описание	Сокращенное наименование расчета	Гетерогенное замерзание капель (да/нет)	Коронный разряд (да/нет)
29 мая 2012 г.	Северный Кавказ (РФ)	Мощная гроза с градом в районе г. Пятигорска	CAU1	нет	нет
			CAU2	нет	да
19 августа 2015 г.	Северный Кавказ (РФ)	Развитие мощных грозо-градовых и суперячейковых процессов. Рассматривается атмосферная ситуация в районе г. Минеральные воды	CAU3	да	нет
7 августа 2015 г.	Китай	Мощная гроза в районе г. Пекина	CHI1	да	нет
11 августа 2017 г.	Китай	Гроза в районе г. Пекина в условиях повышенного содержания фоновое аэрозоля	CHI2	да	нет
			CHI3	да	нет
12 августа 2018 г.	Северо-Запад РФ	Развитие грозового облака с водяным смерчем над акваторией Финского залива в районе Санкт-Петербурга	NW1	да	нет
			NW2	нет	нет
			NW3	нет	да
22 июля 2017 г.	Северо-Запад РФ	Мощная гроза с градом в Санкт-Петербурге	NW4	нет	нет

Таблица 3.2 – Характеристики конвективных ячеек при переходе в грозовую стадию

Сокращенное наименование расчета	Время первого разряда (с момента появления облака) t , с (мин)	H_{top} , км	W , м/с	Q_t , г/м ³	I_{sum} , мм/ч	Q_c , г/м ³	Q_r , г/м ³	Q_i , г/м ³	Q_{ic} , г/м ³
CAU1	1228 с (20 мин)	6,7	18,3	12,0	10,2	1,4	3,7	3,8	0,002
CAU2	1212 с (20 мин)	6,5	18,3	11,9	8,3	1,6	3,5	4,8	0,002
CAU3	766 с (13 мин)	8,3	29,9	21,1	0,0	3,0	2,2	4,0	1,1
CHI1	1544 с (25 мин)	6,3	23,6	21,3	38,1	2,1	5,6	2,4	0,006
CHI2	1046 с (17 мин)	11,9	47,5	23,0	0,0	1,8	1,6	4,0	2,6
CHI3	1110 с (18 мин)	13,1	48,2	23,0	0,0	1,8	1,3	3,0	2,6
NW1	1132 с (18 мин)	6,5	14,7	13,1	28,0	1,6	3,5	5,5	0,6
NW2	1186 с (19 мин)	6,3	14,0	13,8	48,1	1,4	3,9	4,7	0,0
NW3	972 с (16 мин)	5,3	15,9	12,2	0,6	2,0	1,9	3,7	0,01
NW4	946 с (16 мин)	9,1	37,6	10,3	0,0	2,3	0,8	7,1	1,1

Суммарная интенсивность осадков в момент начала разрядов варьировалась от 0 (отсадки отсутствовали) до 48,1 мм/ч. Под суммарной интенсивностью понимается общая интенсивность, включающая как жидкие, так и твердые осадки. Наиболее интенсивные осадки получены в расчете NW2. Сопоставимые результаты получены для расчета СН1 (38,1 мм/ч) и NW1 (28 мм/ч). В половине расчетов осадки отсутствовали или имели интенсивность менее 1 мм/ч. Медиана суммарной интенсивности осадков составила $I_{sum} = 4,4$ мм/ч.

Объемы переохлажденной части облака с отражаемостью более 35-60 dBZ в модели имеют небольшие значения, по сравнению с данными наблюдений, что объясняется высоким пространственным разрешением (области с высокой отражаемостью занимают относительно небольшие зоны в облаке) и небольшими размерами самого облака в расчетной области. В свете этого представляется разумным опираться на их относительные изменения, а не на абсолютные значения. Для двух расчетов (CAU3 и NW4) величины не рассчитывались. VZ35 в расчетах варьируется от 1,4 до 10,3 км³, медиана составляет 2,0 км³. Наибольшие значения соответствуют расчету СН1 (Китай), наименьшие – CAU2 (Северный Кавказ, с учетом коронных разрядов). Медианы объемов имели значения: 1,7 км³ (VZ40), 1,2 км³ (VZ45), 0,9 км³ (VZ50), 0,5 км³ (VZ55) и 0,0 км³ (VZ60). VZ55 равнялся 0 в расчете СН3. VZ60 был равен 0 в пяти расчетах из восьми анализируемых.

Максимальные значения водности и ледности частиц зафиксированы в различных расчетах, в зависимости от того, какие частицы рассматривались. Там, наибольшая суммарная водность (Q_t) и наибольшая ледность облачных кристаллов (Q_{ic}) были отмечены в расчетах СН2 и СН3, их значения в обоих расчетах совпадали составляли 23,0 г/м³ (Q_t , г/м³) и 2,6 г/м³ (Q_{ic}). Наибольшие значения водности облачных капель (Q_c) получены в расчете CAU3 (суперячейковое облако на Северном Кавказе). Максимальная водность дождевых капель ($Q_r = 5,6$ г/м³) соответствует расчету СН1. В то время как расчет NW4 характеризуется максимальной ледностью градин ($Q_i = 7,1$ г/м³). Медианы распределений составили: 13,5 г/м³ (Q_t), 1,8 г/м³ (Q_c), 2,8 г/м³ (Q_r), 4,0 г/м³ (Q_i), 0,3 г/м³ (Q_{ic}).

Для сопоставления результатов расчетов было выполнено нормирование рассматриваемых величин, для чего использовалась следующая формула:

$$X = \frac{(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})},$$

где x – член ряда данных, x_{max} и x_{min} – максимальное и минимальное значение величины соответственно, X – нормированное значение, изменяющееся от 0 до 1 (единица соответствует максимальному значению, 0 – минимальному). В таблице 3.3 приведен пример расчета безразмерной величины X .

Таблица 3.3 – Пример расчета безразмерной величины X для параметра t (время появления первого молниевых разряда)

	CAU1	CAU2	CAU3	СН1	СН2	СН3	NW1	NW2	NW3	NW4
t , сек	1228	1212	766	1544	1046	1110	1132	1186	972	946
$X(t)$	0,59	0,57	0,00	1,00	0,36	0,44	0,47	0,54	0,26	0,23

Нормированные данные представлены на рис. 3.9. На оси абсцисс рисунка серой рамкой объединены расчеты, соответствующие одному и тому же случаю (выполняемые для одного и того же состояния атмосферы), черной рамкой обозначены расчеты с учетом гетерогенного замерзания, синей рамкой – с учетом коронных разрядов). Так, рисунок наглядно демонстрирует, что в расчете СН1 облако медленнее всего переходит в грозовую стадию, в этом же расчете получены наибольшие значения объемов переохлажденной части облака с отражаемость более 35 dBZ (при начале грозовой активности). Расчеты СН2 и СН3 характеризуются одними из самых высоких значений суммарной водности облаков и скорости восходящего потока и т.д.

Полезно рассмотреть учет различных физических процессов внутри групп расчетов, соответствующих одному и тому же случаю развития ОЯ. Так, показано, что учет коронных разрядов (пары расчетов CAU1 и CAU2, NW2 и NW3) приводит к более быстрому переходу облака в грозовую стадию, уменьшению высоты верхней границы, интенсивности осадков и суммарной водности облака в момент начала разрядов. В то же время изменения максимальной ледности градин, скорости восходящего потока и радиолокационной отражаемости в указанных парах расчетов различны по направлению.

Учет гетерогенного замерзания (пара расчетов NW1 и NW2) приводит к более быстрому переходу облака в грозовую стадию, уменьшению интенсивности осадков, увеличению ледности градин и высоты верхней границы облака в момент начала разрядов.

Отдельные группы расчетов с одинаковым учетом физических процессов (CAU1, NW2, NW4 – группа 1; CAU3, СН1, СН2, NW1 – группа 2) позволяют выделить влияние температурно-влажностного строения атмосферы. В группе 1 для расчета NW4 (22 июля 2017 г., Северо-Запад РФ) наблюдались наибольшие значения высоты верхней границы облака и скорости восходящего потока при переходе в грозовую стадию, при том что это облако быстрее всех в группе перешло в грозовую стадию. Это случай соответствует необычно мощному градобитию в Санкт-Петербурге. В группе 2 показано, что наиболее быстрый переход в

грозовую стадию получен для суперъячейки на Кавказе (CAU3), а наиболее медленный – для развития грозового облака в Китае 07 августа 2015 г. (CHI1), при том, что это облако обладало наибольшей интенсивностью осадков в группе и наибольшим объемом VZ35.

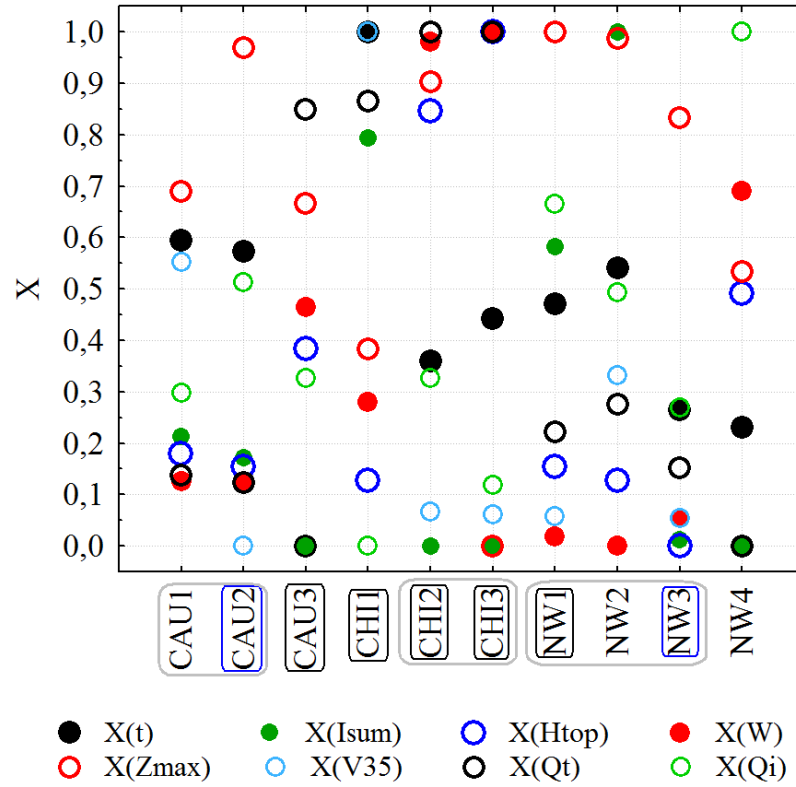


Рисунок 3.9 – Нормированные характеристики облаков при переходе в грозовую стадию

3.4 Применение мезомасштабной модели для определения грозового положения

В настоящем разделе приведены результаты исследования воспроизведения характеристик атмосферы мезомасштабной моделью WRF-ARW, выполнено сравнение с данными аэрологического зондирования. Проведена оценка влияния отклонений модельной стратификации на прогноз развития грозового облака при помощи модели малой размерности.

При написании текста использовались материалы опубликованной соискателем работы:

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.

3.4.1 Модель WRF и методика исследования

WRF – мезомасштабная (региональная) негидростатическая модель численного прогноза погоды, разработанная как для задач оперативного прогноза, так и выполнения исследований протекания физических процессов [127, 128]. WRF учитывает большое количество подсеточных процессов, оказывающих влияющие на состояние атмосферы. Для каждого из учитываемых физических процессов можно выбрать один из множества доступных вариантов параметризации. Особенностью модели является ее свободное распространение, что позволяет исследователям адаптировать модель для задач конкретного исследования и дополнять код, разрабатывая новые параметризации и дополнения к модельному коду. Настойка модели (выбор оптимального сочетания параметризаций) является важной частью исследования [129–133].

Очевидно, что результат прогноза конвективной ситуации, основанный на анализе строения атмосферы (ее стратификации и неустойчивости), напрямую зависит от того, насколько хорошо модель воспроизводит распределение параметров с высотой [134] Целью данного исследования является – изучение точности воспроизведения моделью WRF стратификации атмосферы в районе потенциального прогнозирования гроз на северо-западе РФ.

Исследовалось воспроизведение состояния атмосферы для района Санкт-Петербурга. Для этого по данным наземных метеорологических наблюдений на станции Воейково была сформирована выборка дней, когда наблюдалось развитие конвекции. Выбранный период включал летние месяцы (май – август) с 2008 по 2017 г. Полученная выборка была разделена на две части: конвекция хорошей погоды (развитие *Cu humilis*, *Cu mediocris* и *Cu congestus*) и гроза (*Cb*). Первая часть выборки составила 100 случаев, вторая – 85. Для всех случаев был выполнен расчеты при помощи модели WRF-ARW 3.7.

Начальными данными для расчетов послужили данные глобальной модели GFS – Global Forecasting Model. Они имели пространственное разрешение $0,5^\circ$ и доступны с шагом по времени 6 часов. Для каждого выбранного дня выполнялся отдельный расчет, при этом заблаговременность «квазипрогноза» составляла 18-27 часов.

При выполнении расчетов при помощи мезомасштабной модели использовалась следующая конфигурация расчетных областей (рис. 3.10): две области, одна вложена в другую, пространственное разрешение 9 и 27 км соответственно. Количество точек сетки было равно: $58 \times 55 \times 32$ (область с разрешением 9 км) и $70 \times 70 \times 32$ (область с разрешением 27 км).



Рисунок 3.10 – Конфигурация расчетных областей в модели WRF-ARW при выполнении исследования

Выбор параметризаций подсеточных процессов осуществлялся по литературным данным [135] включал следующие параметры:

- микрофизика — WSM 6-class graupel scheme [136];
- конвекция — Kain-Fritsch scheme [137];
- пограничный слой — YSU scheme [138];
- длинноволновая радиация — rrtm scheme [139];
- коротковолновая радиация — Dudhia scheme [140].

«Квазипрогноз» составлялся для срока, совпадающего с данными аэрологических наблюдений. Вертикальные распределения модельных параметров в точке, ближайшей по координатам к месту расположения выбранной аэрологической станции, сравнивались с

данными аэрологических наблюдений на станции Воейково (26075) – для различных уровней давления. Рассматривались следующие параметры: температура и температура точки росы. По результатам модельных расчетов оценивались отклонения результатов моделирования от данных наблюдений температуры (ΔT) и температуры точки росы (ΔTd), определяемые по формулам:

$$\Delta T = T_{WRF} - T_{OBS}$$

$$\Delta Td = Td_{WRF} - Td_{OBS}$$

Где T_{WRF} , Td_{WRF} – результаты расчетов по модели WRF, а T_{OBS} , Td_{OBS} – данные аэрологических наблюдений.

Помимо общих статистических характеристик отклонений, рассчитывались отклонения отдельно на каждом уровне давления – для основных изобарических поверхностей: 1000, 925, 850, 700, 400, 300, 250, 200, 100 гПа, а также приземные значения (на высоте 2 м). Также все указанные параметры рассматривались отдельно для конвекции хорошей погоды и дней с грозами. Был выполнен дисперсионный анализ, рассчитаны характеристики неустойчивости атмосферы в рассматриваемые дни.

3.4.2 Результаты воспроизведения стратификации атмосферы в мезомасштабной модели

Проанализированы распределения отклонений модельных значений температуры (ΔT) и температуры точки росы (ΔTd) (далее – результатов прогноза) от данных наблюдений. Распределение включает отклонения на всех рассматриваемых вертикальных уровнях и для обеих групп облаков (конвекция хорошей погоды и грозовые облака). Гистограммы распределений приведены на рис. 3.11.

Среднее значение ΔT равно $0,0^\circ\text{C}$, при этом медиана составляет $-0,1^\circ\text{C}$, что также можно считать достаточно хорошим показателем, а мода равна $-0,4^\circ\text{C}$. Распределение на рис. 3.11 демонстрирует, что в некоторых случаях ΔT может достигать больших значений: от $-10,0$ до $14,8^\circ\text{C}$, стандартное отклонение при этом составляет 2,42.

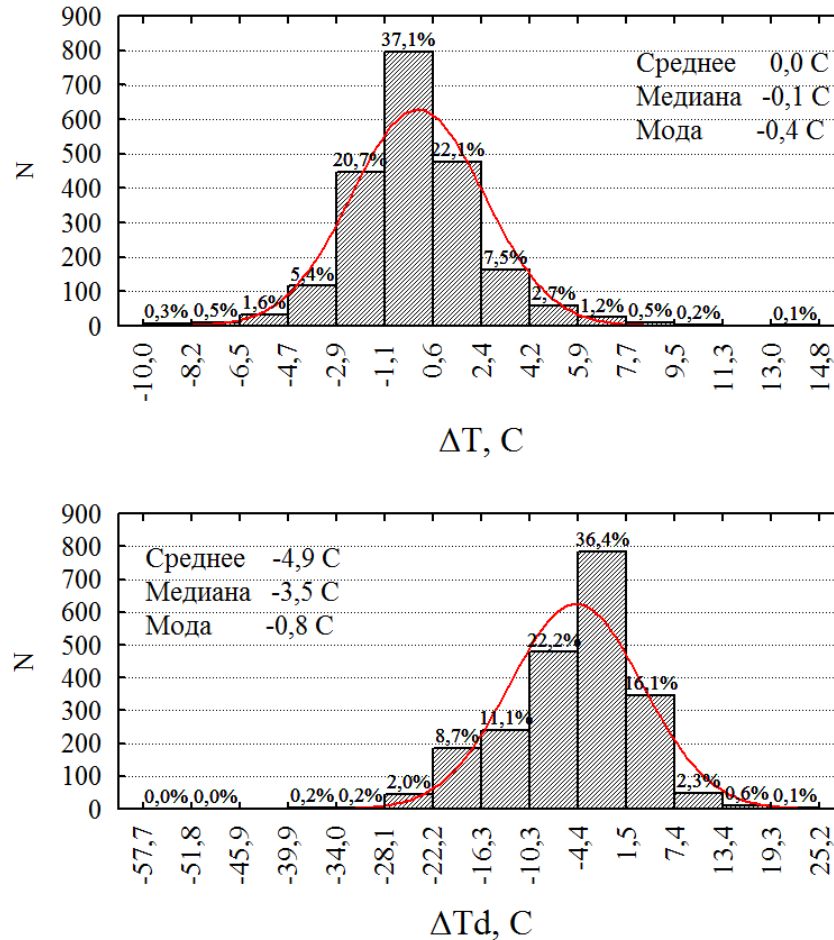


Рисунок 3.11 – Гистограмма повторяемости ΔT и ΔT_d за период май—август 2008—2017 гг.

Температура точки росы, в целом, характеризуется гораздо большими отклонениями, чем температура. Там среднее значение ΔT_d равно $-4,9^{\circ}C$, при этом менее чувствительная к выбросам медиана составляет $-3,5^{\circ}C$, а мода распределения равна $-0,8^{\circ}C$. Ряд ΔT_d характеризуется и большей изменчивостью по сравнению с температурой – величина стандартного отклонения составляет 8,13. Отдельные отклонения достигают десятков градусов.

С целью более точного определения, в каких случаях можно ожидать более точного прогноза, а где вероятны серьезные отклонения модельных данных, были рассмотрены величины отклонений отдельно для каждого из вертикальных уровней. Средние величины отклонений приведены на рис. 3.12. Показано, что величина отклонений приземной температуры воздуха ΔT и отклонения на уровне 1000 гПа равна $1,9^{\circ}C$ и $0,7^{\circ}C$ соответственно (средние значения). В основном облакообразующем слое (925 – 500 гПа) отклонения температуры не так велики, их средние значения варьируются от $-0,1$ до $0,1^{\circ}C$. Далее с высотой средние значения ΔT растут по абсолютной величине. Таким образом, близи подстилающей

поверхности модель (в среднем) завышает значения температуры относительно данных радиозондирования, а с увеличением высоты, наоборот, модельные значения оказываются меньше измеряемых.

Аналогичным образом ведут себя отклонения температуры точки росы, демонстрируя при этом значительные ошибки. Так, вблизи подстилающей поверхности величина ΔT_d составляет $-5,0^\circ\text{C}$, уменьшаясь по абсолютному значению с высотой вплоть до уровня 850 гПа ($\Delta T_d=0^\circ\text{C}$). Далее с высотой ΔT_d снова возрастает по абсолютной величине: до уровня 200 гПа они не более $-2,2^\circ\text{C}$, а на уровнях 150 и 100 гПа достигают -16°C . Таким образом, по всей толщине тропосферы в среднем модель WRF недооценивает влажность. Особенно велики значения отклонений у земли и в подоблачном слое, а также в тропопаузе.

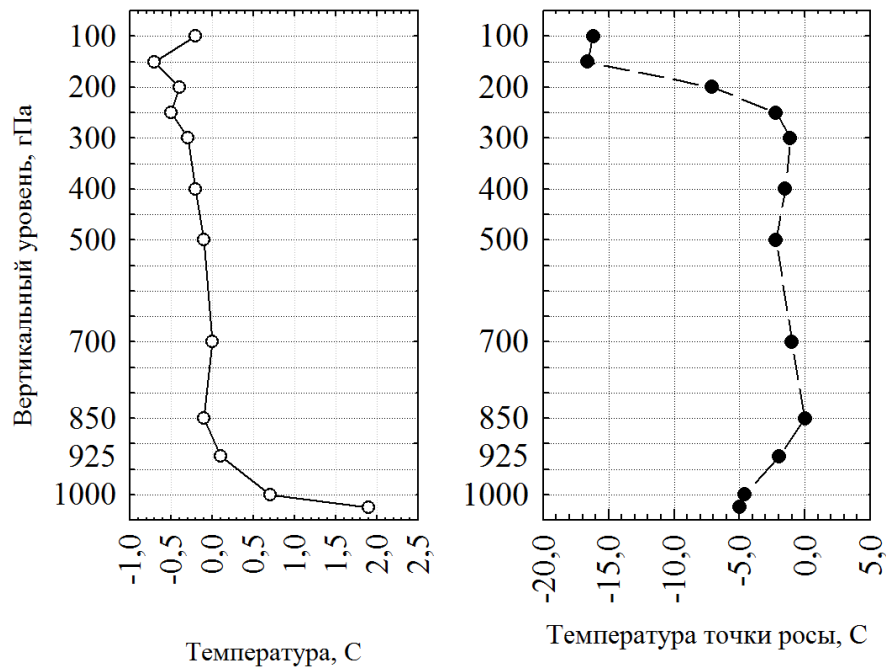


Рисунок 3.12 – Средние значения ΔT и ΔT_d на различных вертикальных уровнях

Рассмотренные статистические характеристики отклонений показывают, что оценки отклонений по модулю в среднем значительно превышают аналогичные оценки с учетом знака. Кроме того, температуры точки росы характеризуется значительно большими величинами среднего квадратического отклонения, чем температура воздуха. При этом коэффициент корреляции температуры по данным моделирования и наблюдений на всех рассмотренных уровнях достаточно высок – от 0,75 до 0,76. В то время как коэффициент корреляции для температуры точки росы в слое от подстилающей поверхности до уровня 500 гПа составляет 0,74–0,80, выше 500 гПа статистическая связь слабая, статистически незначима или вовсе

отсутствует.

Были рассмотрены отдельные характеристики отклонений температуры и температуры точки росы для дней с грозой и при развитии конвективной облачности «хорошей погоды». Приведенные в табл. 3.4 отклонения для различных погодных условий демонстрируют различие средних значений. Так, ΔT_d для дней с грозой на $1,5^\circ\text{C}$ превышает (по абсолютному значению) аналогичный показатель в дни с хорошей погодой.

Таблица 3.4 – Средняя разность температуры и температуры точки росы при различных погодных условиях

Оценка		Погодные условия	Гроза	Кучевая облачность «хорошей» погоды
Δ	ΔT		0,3	-0,2
	ΔT_d		-5,7	-4,2
$ \Delta $	$ \Delta T $		1,9	1,6
	$ \Delta T_d $		7,3	6,6

Для оценки статистической значимости выявленных различий отклонений температуры и температуры точки росы был выполнен дисперсионный анализ (ANOVA). В анализе использовались 2 фактора: высота и погодные условия. Получено, что оба фактора являются статистически значимыми (как для температуры, так и для температуры точки росы). Кроме того, для температуры является значимым и совместное влияние факторов (рис 3.13).

Таким образом, выполненное статистическое исследование показало следующее:

- Отклонения модельной температуры и температуры точки росы зависят от рассматриваемого уровня и погодных условий;
- В дни с грозой получены большие по абсолютной величине отклонения модельных значений температуры и температуры точки росы по сравнению с данными наблюдений;
- Как для температуры, так и для температуры точки росы наблюдаются значительные отклонения в приземном слое, что является критичным для оценки неустойчивости атмосферы;
- На всех рассматриваемых вертикальных уровнях в модели в среднем температура

точки росы существенно ниже, чем по данным наблюдений, что говорит о недооценке влажности воздуха.

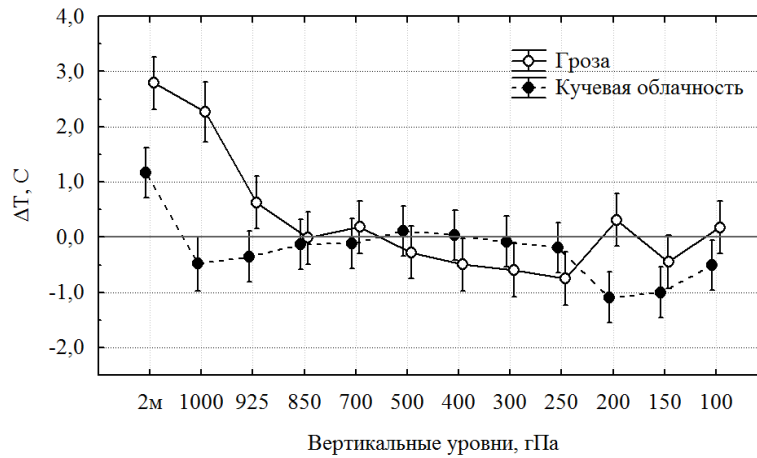


Рисунок 3.13 – Средние вертикальные профили Т при грозе и кучевой облачности

3.4.3 Применение модели конвективного облака (малой размерности) для уточнения параметров грозового облака с использованием данных мезомасштабной модели

Для исследования влияния отклонений стратификации, получаемой с использованием мезомасштабной модели, от данных наблюдений был проанализирован случай грозы 22 июля 2017 г. (Санкт-Петербург). Для этого дня были рассмотрены параметры неустойчивости атмосферы, рассчитанные по двум стратификациям (данные аэрологического зондирования и WRF) и выполнен расчет при помощи модели конвективного облака малой размерности [109].

Результаты воспроизведения стратификации атмосферы моделью WRF для рассматриваемого случая приведены на рис. 3.14. Отклонения температуры и температуры точки соответствуют средним данным, приведенным ранее в тексте работы: получены заниженные значения температуры точки росы вблизи подстилающей поверхности и выше уровня 700 гПа. Температура по модели WRF вблизи подстилающей поверхности также оказывается заниженной, а в основном облакообразующем слое незначительно превышает данные наблюдений.

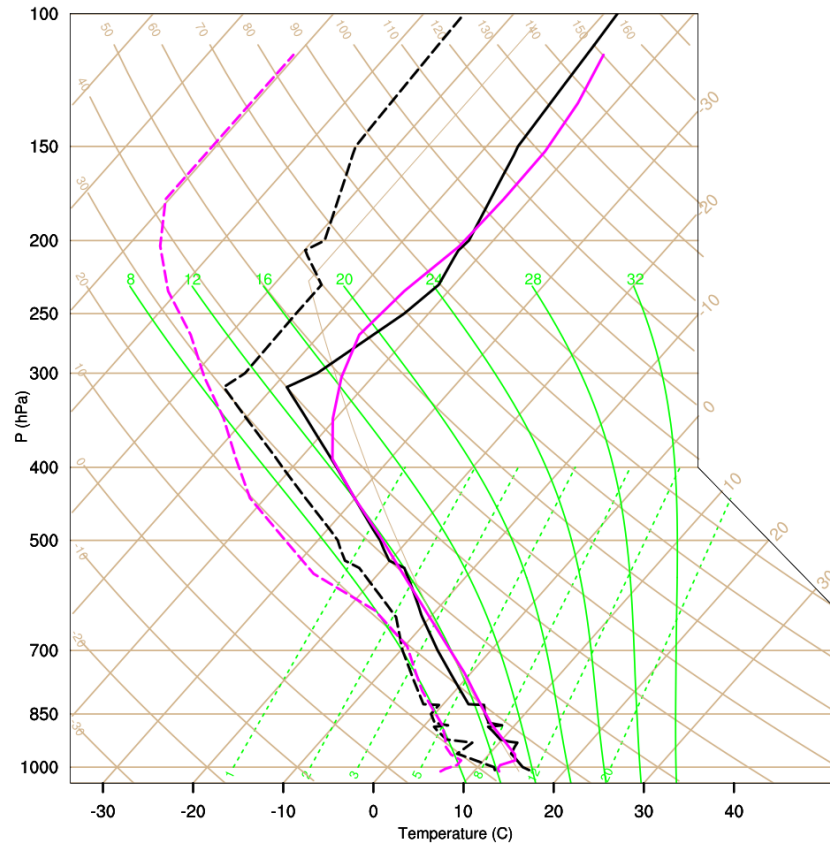


Рисунок 3.14 – Распределение температуры и температуры точки росы в атмосфере для случая грозы 22 июля 2017 года. Приведены прогнозируемые с использованием модели WRF данные (пурпурная линия) и данные наблюдений на станции Воейково (черная линия). Сплошной линией обозначена температура, пунктирной – температура точки росы

Расчитанные характеристики строения и неустойчивости атмосферы приведены в табл. 3.5. В модельной атмосфере оказывается завышен уровень конденсации и занижены те параметры неустойчивости, которые рассчитываются с использованием приземных значений метеорологических параметров. Так, энергия неустойчивости CAPE по данным наблюдений составляла 790 Дж/кг, а по результатам мезомасштабного моделирования она была равна 0. Прочие параметры, не учитывающие уровни с наибольшими отклонениями данных моделирования, мало отличаются от рассчитанных по данным наблюдений.

Расчеты с использованием модели малой размерности показали, что по данным «прогностической» стратификации развитие конвективного облака не происходит, в то время как по данным аэрологического зондирования прогнозируется грозовое облако с максимальной высотой верхней границы 7,4 км.

Таким образом, при выполнении прогноза развития конвекции и грозового положения необходимо учитывать возможные ошибки и чувствительность к ним используемых методов.

Для большого количества разнообразных методик прогноза грозы и других опасных конвективных явлений неточности в приземных значениях параметров и недостаток влаги в основном облакообразующем слое могут привести к серьезным ошибкам.

Таблица 3.5 – Параметры неустойчивости для случая грозы 22 июля 2017 года

Показатель	Данные наблюдений	WRF
Давление на уровне конденсации*, гПа	954	920
Температура на уровне конденсации*, °C	11	5
Индекс Шоуолтера*	2	2
Влага в столбе атмосферы*, см	2	2
CAPE*, Дж/кг	790	0
Число Вайтинга (K-index)	24,4	24,1
Kmod	35,9	31,3
VT	28,7	28,6
CT	22,7	23
TT	51,4	51,6
TTmod	62,9	58,8

Примечание: значения* рассчитаны при помощи функций на языке NCL (NCAR Command Language).

3.5 Результаты ансамблевого прогноза характеристик грозовых облаков на базе модели малой размерности

Ансамблевые расчеты выполнялись по двум версиям модели конвективного облака малой размерности (двум моделям): «полной» модели, учитывающей электризацию облачных частиц (V1) и физико-статистической модели, содержащей эмпирические критерии грозоопасности (V2).

Ансамблевый прогноз является альтернативой детерминированному прогнозу. В отличие от детерминированного, имеющего единственное решение при заданных условиях,

ансамблевый прогноз представляет собой серию расчетов с внесенными возмущениями. Такой метод прогноза позволяет оценить разброс получаемых значений и их статистические характеристики.

Возмущения вносились в начальные данные – результаты аэрологического зондирования. Как было показано ранее, распределения по высоте температуры и влажности могут содержать значительные ошибки. Это касается как данных натуральных наблюдений (подробнее – в Главе 1), так и результатов расчетов при помощи мезомасштабных моделей (раздел 3.4). На основании этого были определены две методики внесения возмущений. В обеих методиках возмущения вносились в значения температуры и относительной влажности. В методике 1 корректировались только приземные значения, в то время как в методике 2 возмущения вносились на всех уровнях (табл. 3.6). Возмущения вносились случайным образом в заданных пределах, для чего был написан скрипт на языке NCL (NCAR Command Language).

Расчеты выполнялись для одного дня – 01 августа 2021 г., когда в Санкт-Петербурге и окрестностях наблюдались грозы. Для каждой из методик было выполнено 30 расчетов с возмущениями начальных данных и контрольный расчет (без возмущений). В качестве начальных данных моделирования использовались данные аэрологического зондирования на станции Воейково (26075) за 15:00 МСК. Для верификации результатов моделирования использовались данные радиолокационных наблюдений при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ-С), установленного в пос. Воейково Ленинградской области. Т.к. в модельных расчетах рассматривались максимальные характеристики облаков за все время развития, то радиолокационные данные также были подвергнуты статистической обработке. Был сформирован массив характеристик облаков, попавших в поле обзора радиолокатора за период 12:00 – 00:00 МСК. При этом за каждый обзор выбирались только максимальные значения. Итоговая выборка послужила базой для сравнения результатов натуральных наблюдений и численного моделирования.

Рассматривались максимальные за все время развития облака значения параметров: высота верхней границы (H_{TOP} , км), скорость восходящего потока (W , м/с), максимальная радиолокационная отражаемость (Z_{MAX} , dBZ), водность облачных и дождевых капель (Q_C и Q_R , г/м³), ледность кристаллических осадков (Q_I , г/м³). Результаты численных расчетов приведены на рис. 3.15 (диаграммы рассеяния полученных значений, максимум и время его достижения) и в табл. 3.7 (статистические характеристики).

Высота верхней границы облаков по результатам моделирования для расчетов по физико-статистической модели (V2) оказалась больше, чем по полной модели (V1). Она менялась от 9,2 до 10,6 км (V1) и от 9,8 до 10,8 км (V2). Медианы составили 10,2 и 10,6 км

соответственно. Физико-статистическая модель демонстрирует меньший разброс данных и более высокие значения контрольного расчета. В целом, полученные значения можно считать достаточно близкими. В всех случаях увеличение приземной температуры, ожидаемо, привело к увеличению высоты верхней границы.

Таблица 3.6 – Используемые методики и модели, величины возмущений, вносимых в начальные данные ансамблевых расчетов

Методика	Модель	Температура	Относительная влажность
Методика 1	Модель осадкообразующего конвективного облака с учетом электризации облачных частиц и частиц осадков (V1)	$\Delta T_{SFC} \leq 5^\circ\text{C}$ $\Delta T \leq 1,5 ^\circ\text{C}$	$\Delta RH_{SFC} \leq 15\%$ $\Delta RH \leq 15 \%$
Методика 2	Физико-статистическая модель (V2)	$\Delta T_{SFC} \leq 5^\circ\text{C}$	$\Delta RH_{SFC} \leq 15$

Примечание: ΔT_{SFC} и ΔRH_{SFC} – возмущения, вносимые в приземные значения температуры и относительной влажности, ΔT и ΔRH – возмущения, вносимые в значения температуры и относительной влажности на высотах.

Аналогичная картина получена для скорости восходящего потока. Медиана была равна 33,7 (V1) и 39,4 м/с (V2). При этом значение контрольного расчета по V1 составило 14,5 м/с, а по V2 – 26,9 м/с. Ансамблевые расчеты показали, что в случае расчетов по V1 значения менялись от 18 до 40 м/с, а для V2 – от 28 до 44 м/с, все значения превышали значения контрольных расчетов.

Максимальная радиолокационная отражаемость в облаке, являющаяся функцией микрофизических характеристик, значительным образом различалась для двух моделей. Так, в группе результатов V1 значения ZMAX находились в пределах 51,4 – 66,5 dBZ, а в группе V2 они изменялись в значительно меньших пределах: от 52,2 до 54,3 dBZ. Медианы V1 и V2 составили 63,2 и 53,5 dBZ соответственно. Таким образом, V2 показала значительно меньшие по величине значения радиолокационной отражаемости облаков и значения имели меньший разброс что, очевидно, являлось отражением результатов воспроизведения удельного содержания дождевых капель и градин, которые вносят наибольший вклад в радиолокационную отражаемость.

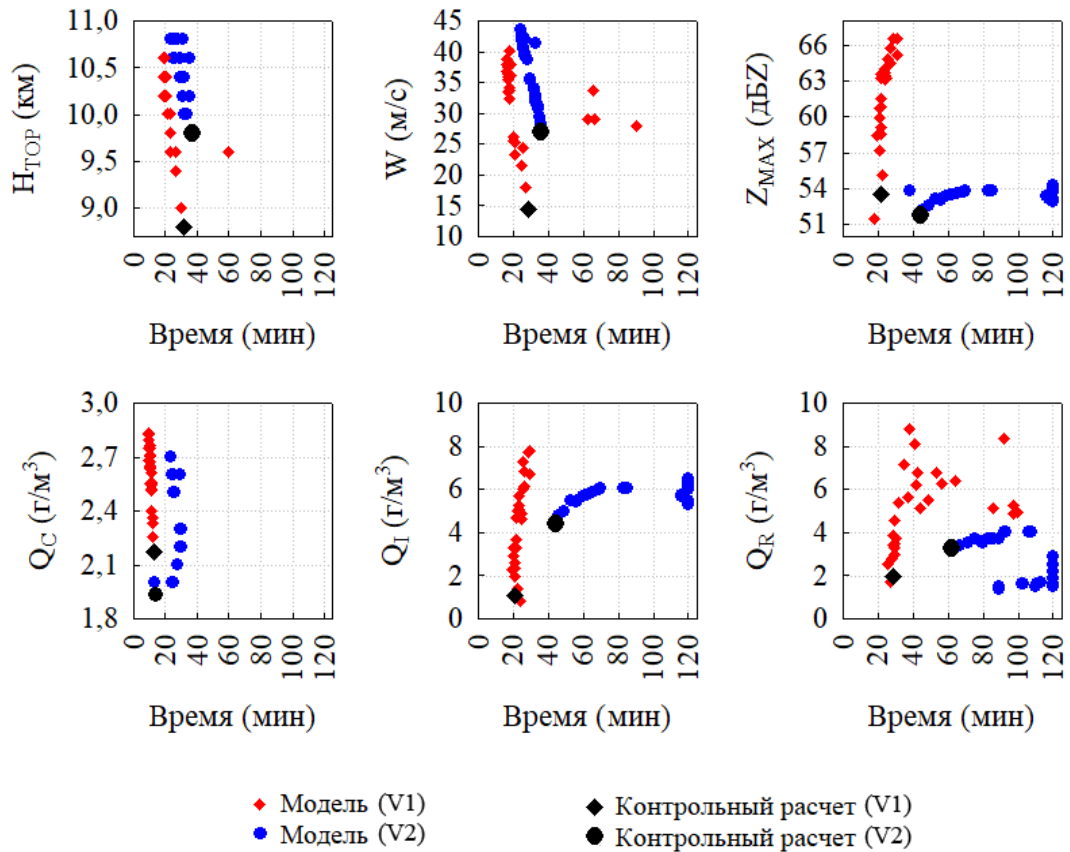


Рисунок 3.15 – Результаты ансамблевых расчетов. Основные характеристики грозовых облаков: максимальные значения характеристик облака при внесении возмущений и время их достижения

Содержание облачных капель (водность) в двух группах ансамблевых расчетов оказалось достаточно близким. Так, значения контрольных расчетов составили 2,2 и 2,0 г/м³ (V1 и V2), максимальные значения – 2,8 и 2,7 г/м³. Совершенно иная картина наблюдается для водности дождевых капель и ледности градин – различались как значения контрольных расчетов, так и характер распределения величин. Водность дождевых капель имела медианные значения 5,1 и 2,4 г/м³. При этом размах значений V2 был равен 2,6 г/м³, а V1 – 7,1 г/м³, что указывает на большую изменчивость данных. Похожая ситуация наблюдалась для ледности градин, где медианные значения составили 5,0 и 5,7 г/м³, а максимальные – 7,7 и 6,5 г/м³. Важным отличием является то, что в обеих моделях при внесении возмущений были получены отдельные результаты со значениями водности дождевых капель меньше, чем в контрольных расчетах. Для V2 значение медианы распределения водности дождевых капель было почти в полтора раза меньше, чем значение, полученное в контрольном расчете. Ледность градин в отдельных расчетах V1 была меньше контрольного значения, в V2 такого не наблюдалось.

Таблица 3.7 – Статистические характеристики максимальных значений параметров грозовых облаков по результатам ансамблевых расчетов

	Модель	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Ст. откл.	Размах	Контрольный расчет
H _{TOP} (км)	V1	10,1	10,2	9,2	10,6	0,41	1,6	8,8
	V2	10,4	10,6	9,8	10,8	0,32	1,0	9,8
W (м/с)	V1	31,9	33,7	18,0	40,1	6,04	22,1	14,5
	V2	37,3	39,4	28,3	43,7	4,77	15,4	26,9
Z _{MAX} (дБZ)	V1	62,1	63,2	51,4	66,5	3,68	15,1	53,5
	V2	53,5	53,5	52,2	54,3	0,45	2,0	51,8
Q _C (г/м ³)	V1	2,6	2,6	2,2	2,8	0,18	0,7	2,2
	V2	2,4	2,5	2,0	2,7	0,24	0,7	2,0
Q _R (г/м ³)	V1	5,1	5,1	1,7	8,8	1,84	7,1	2,0
	V2	2,6	2,4	1,4	4,0	1,04	2,6	3,3
Q _I (г/м ³)	V1	4,7	5,0	0,8	7,7	2,02	6,9	1,1
	V2	5,8	5,7	4,8	6,5	0,39	1,7	4,4

Таким образом, результаты показывают, что внесение возмущений только в приземные значения или же на всех уровнях для некоторых параметров облаков (высота верхней границы, скорость восходящего потока, водность облачных капель) дает похожие результаты. Это подтверждает определяющую роль приземных значений температуры и влажности для развития конвективных облаков. Также результаты показывают, что, хотя модели различным образом воспроизводят микрофизические характеристики облаков, увеличение приземных значений температуры и влажности не всегда приводит к увеличению содержания частиц осадков.

Еще один важный аспект развития конвективной облачности – ее динамика. В выполненной серии расчетов в качестве основного динамического параметра рассматривалось время достижения максимального значения той или иной характеристики. На рис. 3.16 представлены диаграммы размаха времени достижения максимального значения обсуждаемых

характеристик, черными точками обозначена медиана, прочими маркерами – выбросы; результаты контрольных расчетов на рисунке отсутствуют. Временная шкала ограничена 120 минутами – это время принудительного окончания расчета. Таким образом, значения времени достижения максимума 120 мин говорит о том, что характеристика на момент завершения расчета продолжала увеличиваться.

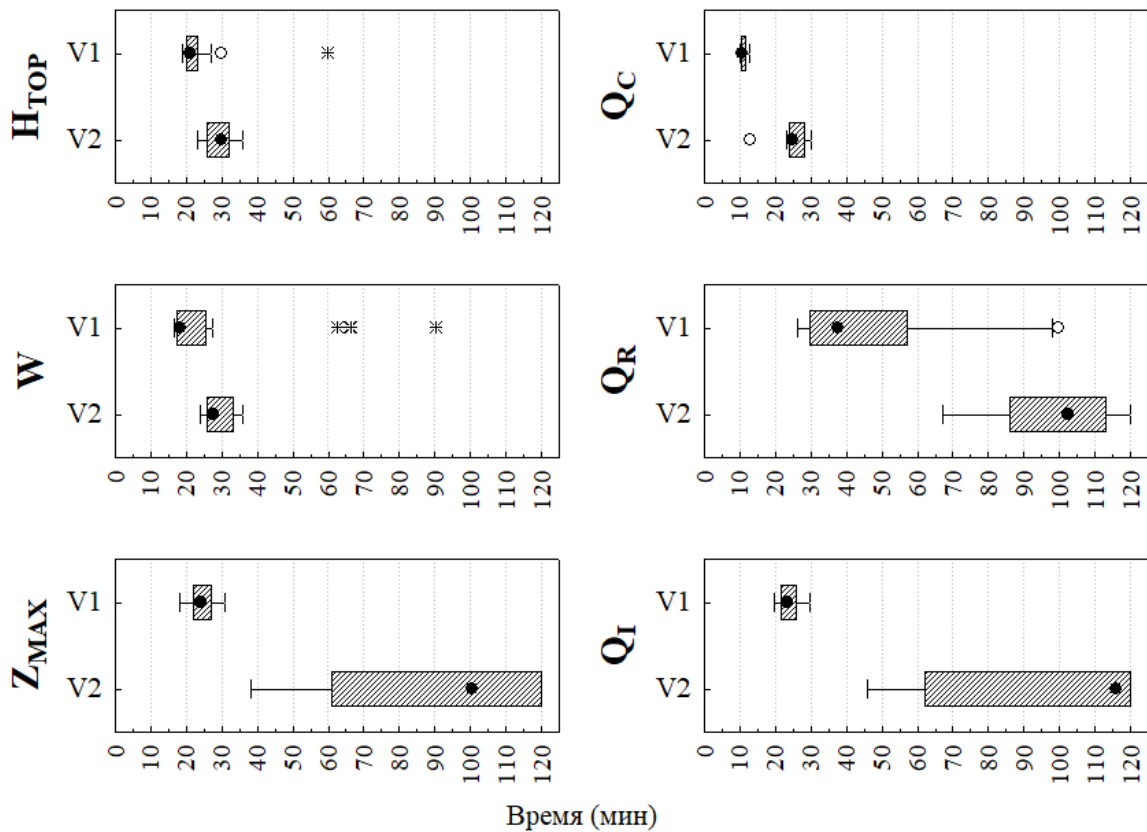


Рисунок 3.16 – Результаты ансамблевых расчетов. Диаграмма размаха времени достижения максимальных значений параметров облаков (мин).

Анализ динамики развития облаков показывает, что время достижения максимального значения высоты верхней границы облака, за исключением единственного выброса (V1), изменялось в пределах 13 мин. При этом в полной версии модели облако достигает максимальной стадии развития на 9 мин быстрее (медианные значения). Похожая картина наблюдается и для скорости восходящего потока: отдельные выбросы значений в полной версии модели, близкий размах значений для обеих версий (не более 12 мин, исключая выбросы), в физико-статистической версии модели облако позднее достигает наибольшего значения скорости восходящего потока (различие медиан также составляет 9 мин). Время

достижения максимального значения водности облачных капель, за исключением одного выброса в физико-статистической модели, изменяется в пределах 3 мин (V1) и 7 мин (V2).

Обе модели демонстрируют большую изменчивость времени достижения максимального значения удельной водности дождевых капель при внесении возмущений. Так, в группе результатов V1, время максимума варьируется в пределах 74 мин, а в группе V2 – 53 мин. При этом положение «ящика» на графике, определяемого значениями 1 и 3 квартилей, в полной версии модели (V1) смещено в область 30-60 мин, в то время как в физико-статистической модели аналогичные данные расположены вблизи интервала 85-115 мин.

Исследование динамики ледности градин показывает, что максимальные значения в полной модели расположены достаточно компактно, их размах составляет не более 10 мин. Физико-статистическая модель, однако, оказалась достаточно чувствительной к возмущениям и максимум ледности градин изменяется в интервале от 46 до 120 мин, т.е. размах составляет 74 мин. Аналогичный характер, по понятным причинам, имеет распределение времени достижения максимального значения радиолокационной отражаемости в облаке. В модели V1 изменчивость данных не превышает 13 мин, в то время как в модели V2 она составляет 82 мин.

Сравнение с данными натурных наблюдений выполнялось по двум контролируемым параметрам: высоте верхней границы облака и радиолокационной отражаемости. Ранее был описан способ формирования выборки данных радиолокационных наблюдений, позволивший говорить о сравнении ансамблей данных. Результаты приведены на рис. 3.17

Для высоты верхней границы показано, что радиолокационные данные (ДМРЛ-С) имеют более широкое распределение, чем результаты расчетов по обеим моделям. Так, значения H_{top} меняются от 9,4 до 15 км (ДМРЛ-С), от 9,2 до 10,6 км (V1) и от 9,8 до 10,8 км (V2). Медианы составляют соответственно 11,7 км (ДМРЛ-С), 10,2 км (V1) и 10,6 км (V2). Таким образом, полученные в результате ансамблевых расчетов значения высоты верхней границы облаков хотя и находятся в пределах аналогичных распределений, полученных по радиолокационным данным, но смещены в область наименьших значений и не достигают ее медианы по величине.

Другая ситуация наблюдается для значений максимальной радиолокационной отражаемости. По данным наблюдений отражаемость менялась от 49,5 до 64 dBZ, медиана распределения составила 56 dBZ. Полная модель осадкообразующего конвективного облака (V1) демонстрирует изменчивость данных, близкую по величине к данным наблюдений: и в том, и в другом случае размах составляет значение, близкое к 15 dBZ. Медиана группы V1, однако, выше, чем данные наблюдений и составляет 63,2 dBZ. В физико-статистической модели максимальная радиолокационная отражаемость меняется мало: от 52,2 до 54,3 dBZ, ее медиана составляет 53,5 dBZ. Таким образом можно заключить, что физико-статистическая модель

осадкообразующего конвективного облака в ансамблевых расчетах показала значения в пределах распределений натуральных данных, а именно в левой (нижней) части этого распределения и не достигающие величины медианы. В то время как расчеты по полной модели показали достаточно близкую с данными наблюдений изменчивость данных, хотя сами значения превышают данные наблюдений на 7 dBZ (медиана).

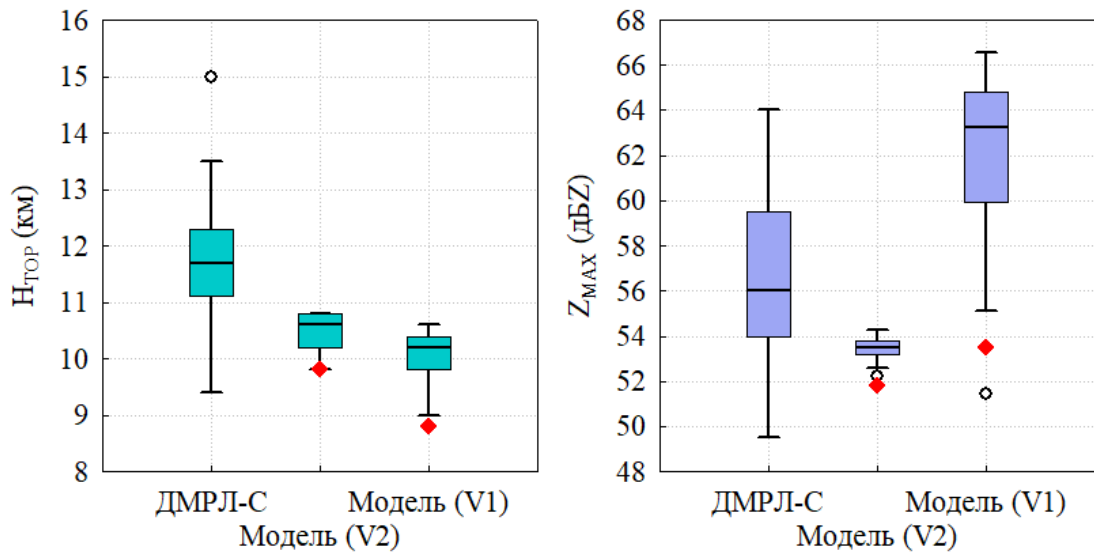


Рисунок 3.17 – Результаты верификации ансамблевых расчетов по данным радиолокационных наблюдений (ДМРЛ-С). Результаты контрольных расчетов (без возмущений) обозначены красным маркером

3.5 Выводы к главе 3

1. Выполнено моделирование развития грозовых облаков с помощью трехмерной нестационарной модели конвективной облачности при следующих параметрах, учитываемых (варьируемых) в расчетах: гетерогенное замерзание облачных частиц, спектры распределения капель и ледяных частиц по размерам (влияние аэрозольного загрязнения), активные воздействия льдообразующим реагентом, различное температурно-влажностное строение атмосферы. Выполнено 30 расчетов для трех регионов – Северо-Западный России и Северо-Кавказский регионы России и Китай.

2. Исследование эволюции электрической структуры облака показало, что высота формирования разряда увеличивается на этапе развития облака и стационарируется вблизи уровня -22°C при переходе в стадию зрелости;

3. Корреляционные исследования временных рядов вертикальной составляющей напряженности электрического поля под/над/внутри облака показали, что экстремумы внутри облака, над его верхней границей, под облаком вблизи подстилающей поверхности не всегда коррелируют между собой, коэффициенты корреляции составили от 0,59 до 0,94;

4. Исследование влияния аэрозольного загрязнения на процесс формирования грозовых облаков показало, что в условиях пониженной влажности в атмосфере и большой высоты нижней границы облака наибольший эффект оказывают процессы, связанные с взаимодействием частиц с градинами – так, при смещении спектра распределения ледяных частиц по размерам в сторону их уменьшения, существенно уменьшается количество выпадающих из облака осадков, содержание градин в целом, увеличивается время жизни облака;

5. Показано, что гетерогенное замерзание капель способствует усилению процессов осадкообразования в облаке, его электризации и разделению зарядов, а также может приводить к формированию инвертированной структуры заряда;

6. Исследование динамики пространственной структуры восходящих (нисходящих) потоков в облаке показало, что восходящие потоки в облаке на стадии развития в основном сконцентрированы в наветренной части облака, наиболее мощные нисходящие потоки наблюдаются в подоблачном слое и связаны с выпадающими осадками, при этом даже на стадии диссипации в верхней части облака могут сохраняться восходящие потоки с достаточно большими значениями скорости;

7. Оценка физического эффекта активных воздействий на облако кристаллизующим реагентом 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;

8. Моделирование активных воздействий на облака с уточненным слоем воздействий (учитывается повышенная температура внутри облака по сравнению с невозмущенной атмосферой) показали, что в таком случае незначительно уменьшается максимальная интенсивность выпадения града, уменьшается площадь интенсивного выпадения града (> 5 мм/ч) и незначительно уменьшается максимальное количество града, выпавшее на единицу площади;

9. 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 градин – 0,9 и 4,0 г/м³. Показано, что наименьшие значения скорости восходящего потока при начале разрядов составили 14 м/с, высоты верхней границы – 5,3 км, максимальной радиолокационной отражаемости – 51,4 dBZ.

10. Анализ воспроизведения стратификации атмосферы при помощи мезомасштабной модели WRF при различных погодных условиях (гроза и конвекция хорошей погоды) показал, что отклонения имеют статистически значимые различия в зависимости от рассматриваемой высоты и погодных условий. Наиболее значимые для прогноза отклонения температуры и температуры точки росы наблюдаются вблизи подстилающей поверхности. Получено, что при заданных настройках модели наблюдаются заниженные значения температуры точки росы почти на всех рассмотренных уровнях давления.

11. Ансамблевые расчеты при помощи модели малой размерности показали, что увеличение приземных значений температуры и влажности не всегда приводит к увеличению удельного содержания частиц осадков в облаке;

12. Сравнение результатов двух групп ансамблевых расчетов с различной методикой внесения случайных возмущений в начальные данные показало, что наиболее чувствительными к возмущениям являются микрофизические параметры облаков (водность и ледность облачных частиц и частиц осадков), а также их функции (максимальная радиолокационная отражаемость). На возмущения реагируют как абсолютные экстремумы параметров, так и время их достижения, т.е. оказывается влияние на динамику развития облаков.

Вклад соискателя в выполнение работ, результаты которых приведены в Главе 3, состоит

в участии в постановке задачи исследований, выполнении расчетов в подготовке начальных данных, выполнении расчетов с использованием численных моделей и анализе их результатов.

Результаты расчетов, приведенные в настоящем разделе, выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках работ по грантам 17-05-00965, БРИКС_т 18-55-80020 и при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 22-27-20031) и Санкт-Петербургского научного фонда (Соглашение № 58/2022 от 15 апреля 2022 г.).

Результаты получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ [141], суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<https://www.spbstu.ru>) и суперкомпьютера Росгидромета.

Заключение

В ходе выполнения работы исследованы характеристики грозовых облаков и атмосферы с использованием радиолокационных данных, данных систем регистрации грозовых разрядов и численного моделирования. Были рассмотрены облака Северо-Запада России, Северного Кавказа, Индии и Китая. Показано изменение различных параметров при переходе облаков в грозовую стадию. Получены характеристики грозовых облаков муссонного и постмуссонного периода в Индии. Всего было выполнено и детально проанализировано 30 расчетов по трехмерной нестационарной численной модели облачной конвекции, 63 расчета с использованием модели конвективного малой размерности и 185 расчетов с применением мезомасштабной модели WRF.

По данным радиолокационных наблюдений получено, что грозовые облака в Индии имеют достаточно малые значения максимальной радиолокационной отражаемости – медиана распределений составила от 40 до 50 dBZ. Зафиксированное максимальное значение составило 58 dBZ. В то время как радиолокационная отражаемость в других регионах могла достигать 59 dBZ (Северо-Запад РФ) и 70 dBZ (Северо-Кавказский регион РФ). Принимая во внимание невысокие значения частоты разрядов в грозовых облаках, это может указывать на малое содержание крупных ледяных частиц в облаках Индии.

В ходе выполнения диссертационной работы показано, что характеристики грозовых облаков в Индии значительным образом различаются для муссонного и постмуссонного сезона. Показано, что в муссонный период облака имеют малую (относительно постмуссонного) высоту верхней границы, радиолокационную отражаемость, переохлажденные объемы облака и другие параметры.

Получено, что единственный радиолокационный параметр, имеющих статистически значимые различия до начала разрядов и при их появлении для всех трех исследованных регионов - Северо-Запада РФ, Северного Кавказа и Индии – высота верхней границы облака.

Показано, что в зависимости от сезона (муссонный и постмуссонный) в Индии изменения параметров при переходе облака в грозовую стадию являются статистически значимыми с различной заблаговременностью. Так, для муссонных облаков в основном оказались значимыми изменения с заблаговременностью 11 мин, а для постмуссонных – 3 мин. Практически для всех параметров, показавших статистически значимые изменения, наблюдалось уменьшение рассматриваемых показателей при начале разрядов, в том числе для радиолокационной отражаемости и высоты верхней границы (для отдельных категорий облаков). Это является необычным результатом, т.к. в остальных рассматриваемых регионах получено значимое увеличение ряда параметров при начале разрядов (максимальной

радиолокационной отражаемости, переохлажденных объемов облака с высокими значениями отражаемости и проч.).

Получены оценки линейных связей между частотой разрядов и различными радиолокационными параметрами (ранговый коэффициент Спирмена) в муссонной и постмуссонный периоды. Показано наличие сильных значимых связей в постмуссонных грозовых облаках Индии с высотой верхней границы, потоком осадков, максимальной радиолокационной отражаемостью, критерием грозоопасности Y , $dV35$ и $dV40$. В грозовых облаках муссонного периода аналогичные связи отсутствовали (или были достаточно слабыми). При этом линейные связи частоты разрядов и радиолокационного параметра $dV35$ для временных рядов развития отдельных облаков в Индии могли отсутствовать, в то время как для рассмотренных грозовых облаков (развитие которых сопровождалось опасными явлениями) других регионов коэффициент корреляции составил от 0,76 до 0,94. Для большей части обнаруженных связей была характерна малая доля объясненной дисперсии. Построенные модели линейной регрессии показали, что связь частоты разрядов с радиолокационными параметрами не может быть ими аппроксимирована (в преобладающем большинстве случаев), что указывает на сложный нелинейный характер рассматриваемых связей.

По результатам трехмерного численного моделирования исследована эволюция электрической структуры облака. Показано, что высота формирования разряда увеличивается на этапе развития облака и стационарируется вблизи уровня -22°C при переходе в стадию зрелости. Результаты расчетов демонстрируют, что экстремумы напряженности электрического поля (вертикальной составляющей) внутри облака, над его верхней границей под облаком вблизи подстилающей поверхности не всегда коррелируют между собой, коэффициенты корреляции составили от 0,59 до 0,94

С использованием трехмерной численной модели показано, что аэрозольное загрязнение атмосферы главным образом оказывает влияние на процессы, связанные с кристаллическими частицами в облаках, и приводит к значительным изменениям эволюции их динамических, микрофизических и электрических характеристик. Получено, что повышенное содержание аэрозоля способствует уменьшению количества осадков, увеличению времени жизни облака.

По результатам моделирования получено, что гетерогенное замерзание капель способствует усилению процессов осадкообразования в облаке, его электризации и разделению зарядов, а также может приводить к формированию инвертированной структуры заряда

Рассмотрена эволюция структуры восходящих и нисходящих потоков в грозовом облаке. Показано, что восходящие потоки в облаке на стадии развития в основном расположены в наветренной части облака, наиболее мощные нисходящие потоки наблюдаются в подоблачном

слое и связаны с выпадающими осадками, при этом даже на стадии диссипации в верхней части облака могут сохраняться восходящие потоки с достаточно большими значениями скорости.

Исследованное влияние активных воздействий на облако льдообразующим реагентом показало, 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. Предложена усовершенствованная методика активных воздействий, учитывающая различия температуры в облаке и невозмущенной атмосфере. Показано, что значения ряда целевых параметров (интенсивность выпадения града, площадь выпадения града, количество града на единицу площади) уменьшаются по сравнению с результатами при принятой на данный момент методикой выполнений воздействий.

Показано, что стратификация атмосферы, получаемая с использованием мезомасштабной модели WRF, может иметь значительные отклонения от данных аэрологического зондирования. Продемонстрировано, что эти отклонения различаются по высоте и наибольшее значения имеют ошибки вблизи подстилающей поверхности. Показано, что в дни с грозами отклонения прогнозируемой стратификации от наблюдаемой оказываются больше, чем в дни с конвекцией хорошей погоды.

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.

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). Показано, что наименьшие значения скорости восходящего потока при начале разрядов составили 14 м/с, высоты верхней границы – 5,3 км, максимальной радиолокационной отражаемости – 51,4 dBZ.

Список используемых источников

1. Атлас облаков / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова / Д. П. Беспалов и др.; под ред. Л. К. Сурыгина. Санкт-Петербург: Д'АРТ, 2011. 248 с.
2. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 752 стр.
3. Довгало Ю. А., Ивлев Л. С. Физика водных и других атмосферных аэрозолей // СПб: издательство С.-Петербургского университета. 1998. 322 с.
4. Шметер С. М. Физика конвективных облаков // Л.: Гидрометеиздат. 1972. 236 с.
5. Спрыгин А. А. Параметры долгоживущих мощных конвективных структур на Европейской территории России и сопредельных территориях и возможности унификации их прогноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 21–47. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-21-47>
6. Роджерс Р. Р. Краткий курс физики облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 228 с.
7. Шакина Н. П. Лекции по динамической метеорологии. М.: ТРИАДА ЛТД, 2013. 160 с.
8. Успенский Б. Д., Веселова Г. К. Новая аэрологическая диаграмма и применение ее при диагнозе и прогнозе погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 27 с
9. Петерсен С. Анализ и прогноз погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 652 с.
10. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество Л.: Гидрометеиздат, 1964. 401 с.
11. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 134 с.
12. Pepler R. A. A Review of Static Stability Indices and Related Thermodynamic Parameters. Illinois State Water Survey / Technical Report. 1988. 94 p.
13. Чернокульский А. В., Елисеев А. В., Козлов Ф. А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27–41.
14. Горбатенко В. П., Кужевская И. В., Пустовалов К. Н., Чурсин В. В., Константинова Д. А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108–117.
15. Haberlie A. M., Ashley W. S., Battisto C. M., Gensini V. A. Thunderstorm activity under intermediate and extreme climate change scenarios // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49, e2022GL098779. <https://doi.org/10.1029/2022GL098779>

16. Золотухина О. И. Термодинамические условия образования опасных конвективных явлений в районе космодрома "Восточный" // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2020. № S674. С. 181–187.
17. Быков А. В., Ветров А. Л., Калинин Н. А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 363. С. 101–119.
18. Зайцева Н. А., Балагуров А. М., Крестьяникова Н. Н., Николаев А. В. Современное состояние и перспективы развития аэрологической сети России // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 5–20. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-9-5-20>
19. Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. Валидация выходных данных глобальной модели атмосферы в дни с развитием конвекции по данным аэрологического зондирования с двухсуточной заблаговременностью // Труды ГГО. 2019. Вып. 593. С. 150–159.
20. Нечепуренко О. Е., Кужевская И. В., Пустовалов К. Н., Горбатенко В. П., Кравец К. А. Грозовая активность и характеристика неустойчивости атмосферы по данным реанализа ERA5 над азиатской частью Арктического сектора России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 4(390). С. 25–45.
21. Лаврова И. В., Анискина О. Г., Волобуева О. В., Ефимова Ю. В., Топтунова О. Н., Винокурова Е. В. Сравнение данных реанализа ERA, JRA и NCEP по ветру // Навигация и гидрография. 2023. № 70. С. 70–85.
22. Ukkonen P., Mäkelä A. Evaluation of machine learning classifiers for predicting deep convection // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2019. Vol. 11. Pp. 1784–1802. <https://doi.org/10.1029/2018MS001561>
23. Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. Прогноз града с заблаговременностью до трех суток по выходным данным глобальной модели атмосферы // Труды ГГО. 2020. Вып. 598. С. 204–214.
24. Battaglioli F., Groenemeijer P., Púčik T., Taszarek M., Ulbrich U., Rust H. Modeled Multidecadal Trends of Lightning and (Very) Large Hail in Europe and North America (1950–2021) // J. Appl. Meteor. Climatol. 2023. Vol. 62. Pp. 1627–1653. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0195.1>
25. Cardoso-Bihlo E., Khouider B., Schumacher C., De La Chevrotière M. Using radar data to calibrate a stochastic parametrization of organized convection // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2019. Vol. 11. Pp. 1655–1684. <https://doi.org/10.1029/2018MS001537>
26. Etten-Bohm M., Yang J., Schumacher C., Jun M. Evaluating the relationship between lightning and the large-scale environment and its use for lightning prediction in global climate models //

- Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2021. Vol. 126, e2020JD033990. <https://doi.org/10.1029/2020JD033990>
27. Ripesi P. Automatic cumulonimbus and towering cumulus identification based on the Italian weather radar network data // Weather. 2024. Vol. 79. Pp. 163–169. <https://doi.org/10.1002/wea.4482>
 28. Geng Y., Li Q., Lin T., Yao W., Xu L., Zheng D., et al. (2021) A deep learning framework for lightning forecasting with multi-source spatiotemporal data // Q J R Meteorol Soc. 2021. Vol. 147(741). Pp. 4048–4062. <https://doi.org/10.1002/qj.4167>
 29. Jeppesen J. H., Jacobsen R. H., Inceoglu F., Toftegaard T. S. A cloud detection algorithm for satellite imagery based on deep learning // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 229. Pp. 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.039>
 30. Handel S. C., Cummins K. L., Krider E. P. (2022). Surface potential gradients and NEXRAD radar reflectivities before the onset of lightning at the KSC-ER // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2022. Vol. 127, e2022JD036681. <https://doi.org/10.1029/2022JD036681>
 31. Zhao Ch., Zhang Y., Zhai H., et al. Bridging the polarimetric structure and lightning activity of isolated thunderstorm cells during the cloud life cycle // Atmospheric Chemistry and Physics. 2025. Vol. 25. Pp. 13453–13473. <https://doi.org/10.5194/acp-25-13453-2025>
 32. Mattos E. V., Machado L. A. T., Williams E. R., Goodman S. J., Blakeslee R. J., Bailey J. C. Electrification life cycle of incipient thunderstorms // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. Vol. 122. Pp. 4670–4697. <https://doi.org/10.1002/2016JD025772>
 33. Wang S., Wada Y., Hayashi S., Ushio T., Chandrasekar V. Observation of electrical alignment signatures in an isolated thunderstorm by dual-polarized phased array weather radar and the relationship with intracloud lightning flash rate // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2024. Vol. 129, e2023JD040681. <https://doi.org/10.1029/2023JD040681>
 34. Zhuang Y., Fu R., Marengo J. A., Wang H. Seasonal variation of shallow-to-deep convection transition and its link to the environmental conditions over the Central Amazon // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. Vol. 122. Pp. 2649–2666. <https://doi.org/10.1002/2016JD025993>
 35. López J. A., Montanyà J., van der Velde O. A., Pineda N., Salvador A., Romero D., et al. Charge structure of two tropical thunderstorms in Colombia // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2019. Vol. 124. Pp. 5503–5515. <https://doi.org/10.1029/2018JD029188>
 36. Xu W. Thunderstorm climatologies and their relationships to total and extreme precipitation in China // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. Vol. 125, e2020JD033152. <https://doi.org/10.1029/2020JD033152>

37. van Schalkwyk L., Blamey R. C., Gijben M., Reason C. J. C. A climatology of dryline-related convection on the western plateau of subtropical southern Africa // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2023. Vol. 128, e2023JD038966. <https://doi.org/10.1029/2023JD038966>
38. Bergemann M., Khouider B., Jakob C. Coastal tropical convection in a stochastic modeling framework // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2017. Vol. 9, Pp. 2561–2582. <https://doi.org/10.1002/2017MS001048>
39. Брылев Г. Б., Гашина С. Б., Низдойминога Г. Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков / под ред. В.Д. Степаненко. Л.: Гидрометеоиздат. 1986. 234 с.
40. Калинин Н. А., Смирнова А. А., Заморин И. С. Статистическое исследование верхней границы радиоэха облачности // *Географический вестник*. 2006. № 1(3). С. 99–107.
41. Аджиев А. Х., Богаченко Е. М. Грозы Северного Кавказа // *Нальчик: Полиграфсервис и Т.* 2011. 172 с.
42. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Михайловский Ю. П., Синькевич А. А., Попов В. Б., Аджиев А. Х. Исследование особенностей развития процессов электризации и градообразования в суперячейковом облаке дистанционными радиофизическими средствами // *Труды ГГО*. 2020. Вып. 596. С. 96–130.
43. Heysmsfield G. M., et al. Characteristics of deep tropical and subtropical convection from nadir-viewing high-altitude airborne Doppler radar // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2010. Т. 67(2). Pp. 285-308. <https://doi.org/10.1175/2009JAS3132.1>
44. Bordoloi A., Chakraborty A., Nanjundiah R. S. (2025) Enhanced Covariability of Indian and Sahelian Summer Monsoons in Recent Decades // *Environmental Research Communications*. 2025. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ae25c4>
45. Allen D., Pickering K., Avery M., Li Z., Shan S., Morales Rodriguez C. A., Artaxo P. (2024). A CloudSat and CALIPSO-based evaluation of the effects of thermodynamic instability and aerosol loading on Amazon Basin deep convection and lightning // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024. Vol. 129, e2023JD039818. <https://doi.org/10.1029/2023JD039818>
46. Bhattacharyya S., Chakraborty A., Nanjundia R. (2025). Indian Summer Monsoon: Predictions and Applications // *Journal of the Indian Institute of Science*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s41745-025-00491-7>
47. Das S., Mahanta R., Banerjee B., Goswami B. N. Changing Northeast India Summer Monsoon Onset Dynamics in a Warming World // *International Journal of Climatology*. 2025. <https://doi.org/10.1002/joc.70211>
48. Uma K. N., Sama B. Characteristics of monsoon convection and its interaction with the large-scale environment over the gateway of the Indian summer monsoon: insights from radar

- observations and reanalysis // *Climate Dynamics*. 2025. Vol. 63. <https://doi.org/10.1007/s00382-025-07879-2>
49. Sindhu K. D., Bhat G. S. Seasonal characteristics of storms over the Indian subcontinent // *Sci Rep*. 2021. Vol. 11, 3355. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82237-w>
 50. Rupraj B., Partha R., Imolemba, Imlisunup, Debajyoti S., Gour P. P., Sanjay S. Regional variation of electrical and lightning properties of thunderclouds during the pre-monsoon season over the north-eastern and eastern part of India // *Atmospheric Research*. 2021. Vol. 260, 105683. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105683>
 51. Qie X., Wei L., Zhu K., et al. Regional differences of convection structure of thunderclouds over the Tibetan Plateau // *Atmospheric Research*. 2022. Vol. 278, 106338, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106338>
 52. Rajagopal M., Russell J., Skok G., Zipser E. Tracking mesoscale convective systems in IMERG and regional variability of their properties in the tropics // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2023. Vol. 128, e2023JD038563. <https://doi.org/10.1029/2023JD038563>
 53. Morvais F., Liu C. Differences in thunderstorms' ice microphysics between the Amazon and central Africa inferred from spaceborne passive microwave and radar observations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024. Vol. 129, e2024JD041223. <https://doi.org/10.1029/2024JD041223>
 54. Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М. Электричество облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 456 с.
 55. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 418 с.
 56. Никандров В. Я. Метеорологический аспект электризации конвективного облака. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 42 с.
 57. Мучник В. М. Физика грозы. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 352 с.
 58. Stolzenburg M., Rust W. D., Marshall T. C. Electrical structure in thunderstorm convective regions: 2. Isolated storms // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103(D12). Pp. 14079–14096. <https://doi.org/10.1029/97JD03547>
 59. Wiens K. C. Thunderstorm electrical structures observed by lightning mapping arrays // *Second Conference on Meteorological Applications of Lightning Data*. 2006. Электронный ресурс: https://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/paper_104464.htm (дата обращения - 24.12.2025)
 60. Stolzenburg M., Marshall T. C. Charge Structure and Dynamics in Thunderstorms // *Space Sci Rev*. 2008. Vol. 137. Pp. 355–372 <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9338-z>

61. Stough S. M., Carey L. D., Schultz C. J., Cecil D. J. (2021). Examining conditions supporting the development of anomalous charge structures in supercell thunderstorms in the Southeastern United States // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(16), e2021JD034582. <https://doi.org/10.1029/2021JD034582>
62. Coquillat S., Pont V., Lambert D., Houel R., Pardé M., Kreitz M., et al. Six years of electrified convection over the island of Corsica monitored by SAETTA: General trends and anomalously electrified thunderstorms during African dust south flow events // *Atmospheric Research*. 2022. Vol. 275, 106227. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2022.106227>
63. Houel R., Defer E., Lambert D., Prieur S., Pédeboy S. Electrical properties of vertical dominant charge structures observed in Corsican thunderstorms with a LMA // *Earth and Space Science*. 2024. Vol. 11, e2023EA003354. <https://doi.org/10.1029/2023EA003354>
64. Гальперин С. М., Кашлева Л. В., Михайловский Ю. П., Степаненко В. Д. Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при воздействиях (самолетные исследования) // В сборнике: *Вопросы атмосферного электричества*. Ленинград. 1990. С. 76–102.
65. Довгальюк Ю. А., Драчева В. П., Егоров А. Д., Качурин Л. Г., Пономарев Ю. Ф., Синькевич А. А., Станкова Е. Н., Степаненко В. Д. Результаты комплексных исследований характеристик мощного кучевого облака после воздействия // *Метеорология и гидрология*. 1997. № 11. С. 20–29.
66. Синькевич А. А. Конвективные облака Северо-Запада России // СПб.: Гидрометеиздат. 2001. 107 с.
67. Зекореев Р. Х., Камбиев М. М., Машуков Х. Х. Исследование электрической структуры грозных облаков по результатам ракетного зондирования // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 4. С. 113–121.
68. Bennett A. J., Harrison R. G. Atmospheric electricity in different weather conditions // *Weather*. 2007. Vol. 62. Pp. 277–283. <https://doi.org/10.1002/wea.97>
69. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Стародубцев С. А., Торопов А. А. Всплески нейтронов во время молниевых разрядов облако–земля // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2013. Т. 77, № 5. С. 652.
70. Попов И. Б. Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // *Труды ГГО*. 2008. Вып. 558. С. 152–161.
71. Муллаяров В. А., Торопов А. А., Козлов В. И., Каримов Р. Р. Особенности пространственного распределения положительных грозных разрядов на востоке Сибири // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 6. С. 47–55.

72. Клименко В. В., Мареев Е. А., Шаталина М. В., Шлюгаев Ю. В., Соколов В. В., Булатов А. А., Денисов В. П. О статистических характеристиках электрических полей грозовых облаков в атмосфере // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 864–874.
73. Пустовалов К. Н., Нагорский П. М. Сравнительный анализ электрического состояния приземного слоя атмосферы при прохождении кучево-дождевых облаков в теплый и холодный периоды года // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 6. С. 451–455.
74. Готюр И. А., Коровин Е. А., Чернышев С. В., Щукин Г. Г., Юсупов И. Е. Экспериментальная сеть датчиков мониторинга грозовой активности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2022. № S685. С. 66–74.
75. Кононов И. И., Коровин Е. А., Щукин Г. Г., Юсупов И. Е. Направления совершенствования пассивных радиотехнических средств мониторинга грозовой активности // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 108–115. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-12-108-115>
76. Blakeslee R. Lightning Imaging Sensor (LIS) Science Data // Dataset available online from the NASA Global Hydrology Resource Center DAAC, Huntsville, Alabama, U.S.A. 1998. <http://dx.doi.org/10.5067/LIS/LIS/DATA201>
77. Иудин Д. И., Сысоев А. А., Раков В. А. Проблемы инициации и развития молнии // Известия высших учебных заведений // Радиофизика. 2021. Т. 64, № 11. С. 867–894.
78. Сысоев А. А., Иудин Д. И., Коровкин Н. В., Емельянов А. А., Жаворотков И. Ю. Численное моделирование начального импульса пробоя на стадии формирования лидера молнии // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 19–40.
79. Stolz D. C., Rutledge S. A., Pierce J. R., van den Heever S. C. A global lightning parameterization based on statistical relationships among environmental factors, aerosols, and convective clouds in the TRMM climatology // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. Vol. 122. Pp. 7461–7492. <https://doi.org/10.1002/2016JD026220>
80. Romps D. M., Charn A. B., Holzworth R. H., Lawrence W. E., Molinari J., Vollaro D. CAPE times P explains lightning over land but not the land-ocean contrast // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45. Pp. 12623–12630. <https://doi.org/10.1029/2018GL080267>
81. Field P. R., Roberts M. J., Wilkinson J. M. Simulated lightning in a convection permitting global model. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2018. Vol. 123. Pp. 9370–9377. <https://doi.org/10.1029/2018JD029295>
82. Анискина О. Г., Стогниева В. В., Толстоброва Н. Б. Прогноз гроз с помощью мезомасштабных гидродинамических моделей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2022. № S685. С. 6–10.

83. Cummings K. A., Pickering K. E., Barth M. C., Bela M. M., Li Y., Allen D., et al. Evaluation of lightning flash rate parameterizations in a cloud-resolved WRF-Chem simulation of the 29–30 May 2012 Oklahoma severe supercell system observed during DC3 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024. Vol. 129, e2023JD039492. <https://doi.org/10.1029/2023JD039492>
84. Bovalo C., Barthe C., Pinty J.-P. Examining relationships between cloud-resolving model parameters and total flash rates to generate lightning density maps // *Q J R Meteorol Soc*. 2019. Vol. 145. Pp. 1250–1266. <https://doi.org/10.1002/qj.3494>
85. Tan Y. B., Shi Z., Chen Z. L., Peng L., Yang Y., Guo X. F., Chen H. R. A numerical study of aerosol effects on electrification of thunderstorms // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2017. Vol. 154. Pp. 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.11.006>
86. Wicker L. J., Wilhelmson R. B. Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm // *J. Atmos. Sci*. 1995. Vol. 52. Pp. 2675–2703.
87. Wang F., Deng X., Zhang Y., Li Y., Zhang G., Xu L., Zheng D. Numerical simulation of the formation of a large lower positive charge center in a Tibetan Plateau thunderstorm // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019. Vol. 124. Pp. 9561–9593. <https://doi.org/10.1029/2018JD029676>
88. Peeters S. A., Mirpour S., Köhn C., Nijdam S. A model for positive corona inception from charged ellipsoidal thundercloud hydrometeors // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022. Vol. 127, e2021JD035505. <https://doi.org/10.1029/2021JD035505>
89. Lane T. P., Sharman R. D. (2014), Intensity of thunderstorm-generated turbulence revealed by large-eddy simulation // *Geophys. Res. Lett*. 2014. Vol. 41. Pp. 2221–2227. <https://doi.org/10.1002/2014GL059299>
90. Fan S., Lu Y., Gao Y., Li Y., Zhang X. Simulation on the development progress of positive glow corona discharge from ground wire of AC/DC transmission lines under thunderstorm condition // *The Journal of Engineering*. 2019. Pp. 2022–2026. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8674>
91. Шаповалов А. А. Численное моделирование электрических процессов в грозовых облаках // *Труды ГГО*. 2018. № 588. С. 28–36.
92. Шаповалов В. А., Ковалев Е. А., Гучаева З. Х., Беккиев К. М., Кузьмин В. А. Формирование макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков в зависимости от структуры поля ветра в атмосфере // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2019. Т. 25, № 4. С. 21–31.
93. Mansell E. R., Ziegler C. L., Bruning E. C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2010. Т. 67. № 1. Pp. 171–194. <https://doi.org/10.1175/2009JAS2965.1>

94. Синькевич А. А., Краус Т. В. Эффективность воздействий кристаллизирующими реагентами на конвективные облака с целью увеличения осадков // Радиолокационная метеорология и активные воздействия под ред. Е.Л. Махоткиной. Санкт-Петербург. 2012. 199 с.
95. Pawar V. S., Domkawale M. A., Pawar S. D., Salvekar P. S. and Pradeep Kumar P. Inter annual variability of tropospheric NO₂ and tropospheric ozone over Maharashtra (India): the role of lightning // Remote Sensing Letters. 2017. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2017.1346398>
96. 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. [Переводная версия] Sin'kevich A. A., Toropova M. L., Mikhailovskii Yu. P., Popov V. B., Pawar S., Gopalakrishnan V. Features of the Relationship between Electrical and Radar Parameters of Thunderclouds in India (Field Studies) // Russian Meteorology and Hydrology. 2021. Vol. 46(6). Pp. 410-415. <https://doi.org/10.3103/S106837392106008X>
97. Carey L. D., Rutledge S. T. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: AC-band polarimetric radar study // Mon. Weath. Rev. 2000. Vol. 128, No. 8 Pp. 2687—2710. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2687:TRBPAL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2687:TRBPAL>2.0.CO;2)
98. Gremillion M. S., Orville R. E. Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy Space Center, Florida: a study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D // Weather Forecasting. 1999. Vol. 14. Pp. 640–649.
99. Mosier R. M., Schumacher C., Orville R. E., Carey L. D. Radar nowcasting of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas // Weather Forecasting. 2011. Vol. 26. Pp. 199–212. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222431.1>
100. Yang Y. H., King P. 2010. Investigating the potential of using radar echo reflectivity to nowcast cloud-to-ground lightning initiation over southern Ontario // Weather Forecasting. 2010. Vol. 25. Pp. 1235–1248. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222387.1>
101. Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Матросов С. Ю., Попов В. Б., Снегуров В. С., Снегуров А. В., Довгальюк Ю. А., Веремей Н. Е. Связь структуры конвективных облаков с частотой молний по результатам радиофизических измерений // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 37–51.
102. Rakov V. A. The physics of lightning // Surv. Geophys. 2013. Vol.34. Pp. 701–729.

103. Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Абшаев А. М. Исследование связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками для многоячейкового кучево-дождевого облака // Труды ГГО. 2018. Вып. 591. С. 25–41.
104. 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. <https://doi.org/10.15372/AOO20201205> [Переводная версия] Sin'kevich A. A., Popov V. B., Abshaev A. M., Bue B., Pawar S. D., Mikhailovskii Yu. P., Gopalakrishnan V., Gekkieva Zh. Radar characteristics of convective clouds during transition to the cumulonimbus stage in different regions of the world // Atmos Ocean Opt. 2021. Vol. 34. No. 2. Pp. 134–139. <https://doi.org/10.1134/S1024856021020081>
105. Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Попов В. Б., Старых Д. С., Довгальюк 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. <https://doi.org/10.15372/AOO20200907>
106. Синькевич А. А., Попов В. Б., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Довгальюк 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. <https://doi.org/10.15372/AOO20200211>
107. Попов В. Б., Синькевич А. А., Янг Д., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Довгальюк 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. [Переводная версия] Popov V. B., Sin'kevich A. A., Mikhailovskii Y. P., et al. Characteristics and Structure of the Cumulonimbus Cloud with Waterspout over the Gulf of Finland // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. Vol. 45, No. 9. Pp. 607–614. <https://doi.org/10.3103/S1068373920090010>
108. Довгальюк 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. [Переводная версия] Dovgalyuk Y. A., Veremei N. E., Sin'kevich A., Mikhailovskii Y. P., Toropova M. L., Popov V. B., Lu J., Yang J. Investigation of electrification mechanisms and relationship between the electrical discharge

- frequency and radar characteristics of the thunderstorm in China. // Russian meteorology and hydrology. 2020. Vol. 45. No. 10. Pp. 712–719. <https://doi.org/10.3103/S1068373920100052>
109. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. Санкт-Петербург: Типография «Моби Дик», 2013. 220 с.
110. Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. 2016. Вып. 582. С. 45–91.
111. 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 высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. № 5, С. 341–353. https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_05_341 [Переводная версия] Mikhailovsky Y. P., Toropova M. L., Veremey N. E., et al. Dynamics of the Electrical Structure of Cumulonimbus Clouds // Radiophys Quantum El. 2021. Vol. 64. Pp. 309–320. <https://doi.org/10.1007/s11414-022-10133-y>
112. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019666622 Российская Федерация. Численная нестационарная трехмерная модель системы взаимодействующих конвективных облаков с возможностью параллельных вычислений. Версия 2019.01 / Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Игнатъев А.А., Пастушков Р.С., Торопова М.Л.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). - № 2019665300; заявл. 26.11.2019; опубл. 12.12.2019 – 700 Кб.
113. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020611456 Российская Федерация. Блок обработки, преобразования и визуализации результатов трехмерного численного моделирования облачной конвекции. Версия 1.0/ Довгалюк Ю.А., Игнатъев А.А., Веремей Н.Е., Торопова М.Л.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). - № 2019665086; заявл. 22.11.2019; опубл. 31.01.2020 – 100 Кб.
114. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020619783 Российская Федерация. Программа, реализующая алгоритм моделирования коронных разрядов в численной нестационарной трехмерной модели системы взаимодействующих конвективных облаков / Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Синькевич А.А., Торопова М.Л.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная

- геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). - № 2020616876; заявл. 02.07.2020; опубл. 25.08.2020 – 700 Кб.
115. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020665659 Российская Федерация. Обработка данных радиозондирования атмосферы для использования в численных моделях облачной конвекции / Веремей Н.Е., Довгальук Ю.А., Торопова М.Л.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). - № 2020664757; заявл. 17.11.2020; опубл. 27.11.2020 – 210 Кб.
116. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020665767 Российская Федерация. Параметризация микрофизических процессов электризации в численной нестационарной трехмерной модели облачной конвекции с учетом коронных разрядов / Веремей Н.Е., Довгальук Ю.А., Синькевич А.А., Торопова М.Л.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). - № 2020664751; заявл. 17.11.2020; опубл. 01.12.2020 – 150 Кб.
117. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020665825 Российская Федерация. Предварительная оценка входных параметров численной нестационарной трехмерной модели облачной конвекции. Версия 2020.01. / Веремей Н.Е., Довгальук Ю.А., Торопова М.Л.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). - № 2020664807; заявл. 19.11.2020; опубл. 01.12.2020 – 300 Кб.
118. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020666309 Российская Федерация. Моделирование влияния электрических сил на осаждение частиц осадков / Веремей Н.Е., Довгальук Ю.А., Торопова М.Л.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). - № 2020664518; заявл. 16.11.2020; опубл. 08.12.2020 – 150 Кб.
119. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683537 Российская Федерация. Постобработка и визуализация результатов трехмерного численного моделирования облачной конвекции «Extremum visualizer» Версия 1.0 : № 2024682917 : заявл. 02.10.2024 : опубл. 14.10.2024 / Г. Д. Федотова, М. Л. Торопова, Н. Е. Веремей ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова».

120. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680038 Российская Федерация. "RawinCompile" (версия 1.0) : № 2023662337 : заявл. 07.06.2023 : опубл. 25.09.2023 / М. Л. Торопова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова».
121. Довгальук 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. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-55-67> [Переводная версия] Dovyalyuk Y. A., Veremei N. E., Sinkevich A. A. [et al.] Effects of High Aerosol Air Pollution on the Evolution of Convective Clouds during a Thunderstorm in China According to Three-dimensional Numerical Simulations // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022. Vol. 47. No 3. Pp. 197–206. <https://doi.org/10.3103/S1068373922030050>
122. Довгальук Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л. Исследование динамики электрической структуры грозо-градового кучево-дождевого облака по данным трехмерного численного моделирования (на примере северо-запада России) // *Труды ГГО*. 2019. Вып. 592. С. 7–22.
123. Синькевич А. А., Тарабукин И. А., Торопова М. Л., Михайловский Ю. П., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Юсупов И. Е., Бочарников Н. В., Лялюшкин А. С., Солонин А. С., Старых Д. С. Структура и характеристики кучево-дождевого облака во время формирования молний // *Оптика атмосферы и океана*. 2023. Т. 36, № 11(418). С. 921–927. <https://doi.org/10.15372/AOO20231107> [Переводная версия] Sin'kevich A. A., Tarabukin I. A., Tоропова M. L., et al. Structure and Characteristics of a Cb during lightning // *Atmos Ocean Opt*. 2024. Vol. 37, No. 2. Pp. 170–177. <https://doi.org/10.1134/S1024856023700082>
124. Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Куров А. Б., Федотова Г. Д. Исследование эффективности активных воздействий на град // *Труды ГГО*. 2024. № 614. С. 60–72.
125. Синькевич А. А. Исследование термических характеристик мощных кучевых облаков с помощью ИК-радиометра // *Метеорология и гидрология*. 1984. № 1. С. 40 – 45.
126. Торопова М. Л. Параметры конвективных облаков при переходе в грозовую стадию по данным трехмерного численного моделирования // *Труды ГГО*. 2021. Вып. 602. С. 23–41.
127. Skamarock W. C., Klemp J. B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications // *J. Comput. Phys*. 2008. Vol. 227 (7). Pp. 3465–3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>

128. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M. G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Tech. Note. 2008. NCAR/TN-475+STR. 113 p.
129. Milovac J., Warrach-Sagi K., Behrendt A., Spath F., Ingwersen J., Wulfmeyer V. (2016) Investigation of PBL schemes combining the WRF model simulations with scanning water vapor differential absorption lidar measurements // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016. Vol. 121. Pp. 624–649.
130. Madala S., Satyanarayana A. N. V., Rao T. N. Performance evaluation of PBL and cumulus parametrization schemes of WRF ARW model in simulating severe thunderstorm events over Gadanki MST radar facility - Case study // *Atmospheric Research*. Vol. 139. Pp. 1-17.
131. Coniglio M. C., Marsh P. T., Kong F. Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations // *Weather and Forecasting*. 2013. Vol. 28. Pp. 842–863. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00103.1>
132. Смирнова М. М., Игнатов Р. Ю. Анализ вертикальной структуры и турбулентности в пограничном слое атмосферы в прогнозах региональной модели // *Ученые записки РГГМУ*. 2011. № 21. С. 57–65.
133. Маддах М. А., Русин И. Н., Ахунд-Али А. М. Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана // *Труды ГГО*. 2017. Вып. 586. С. 191–204.
134. Дементьева С. О., Ильин Н. В., Мареев Е. А. Расчет электрического поля и индекса молниевой активности в моделях прогноза погоды // *Известия РАН. ФАО*. 2015. Т. 51. № 2. С. 210–217.
135. Мостагани С. В., Тарабукин И. А., Дорофеев Е. В. Развитие технологий сверхкраткосрочных прогнозов опасных метеорологических явлений на основе анализа данных наблюдений и результатов численного прогноза погоды гидродинамической модели WRF. // *Труды ГГО*. 2015. № 579. С. 178—204.
136. Hong S.-Y., Lim J.-O. J. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) // *J. Korean Meteor. Soc.* 2006. Vol. 42. Pp. 129—151.
137. Kain J. S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update // *J. Appl. Meteor.* 2004. Vol. 43. Pp. 170—181.
138. Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes // *Mon. Wea. Rev.* 2006. Vol. 134. Pp. 2318—2341.

139. Mlawer E. J., Taubman S. J., Brown P. D., Iacono M. J., Clough S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102 (D14). Pp. 16663—16682.
140. Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model // *J. Atmos. Sci.* 1989. Vol. 46. Pp. 3077–3107.
141. Воеводин В., Жуматий С., Соболев С., Антонов А., Брызгалов П., Никитенко Д., Стефанов К., Воеводин В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // *Открытые системы. СУБД.* 2012. № 7. С. 36.

Приложения

Приложение А. Гистограммы распределений радиолокационных и электрических характеристик грозовых облаков (4 октября 2015 года, штат Махараштра, Индия)

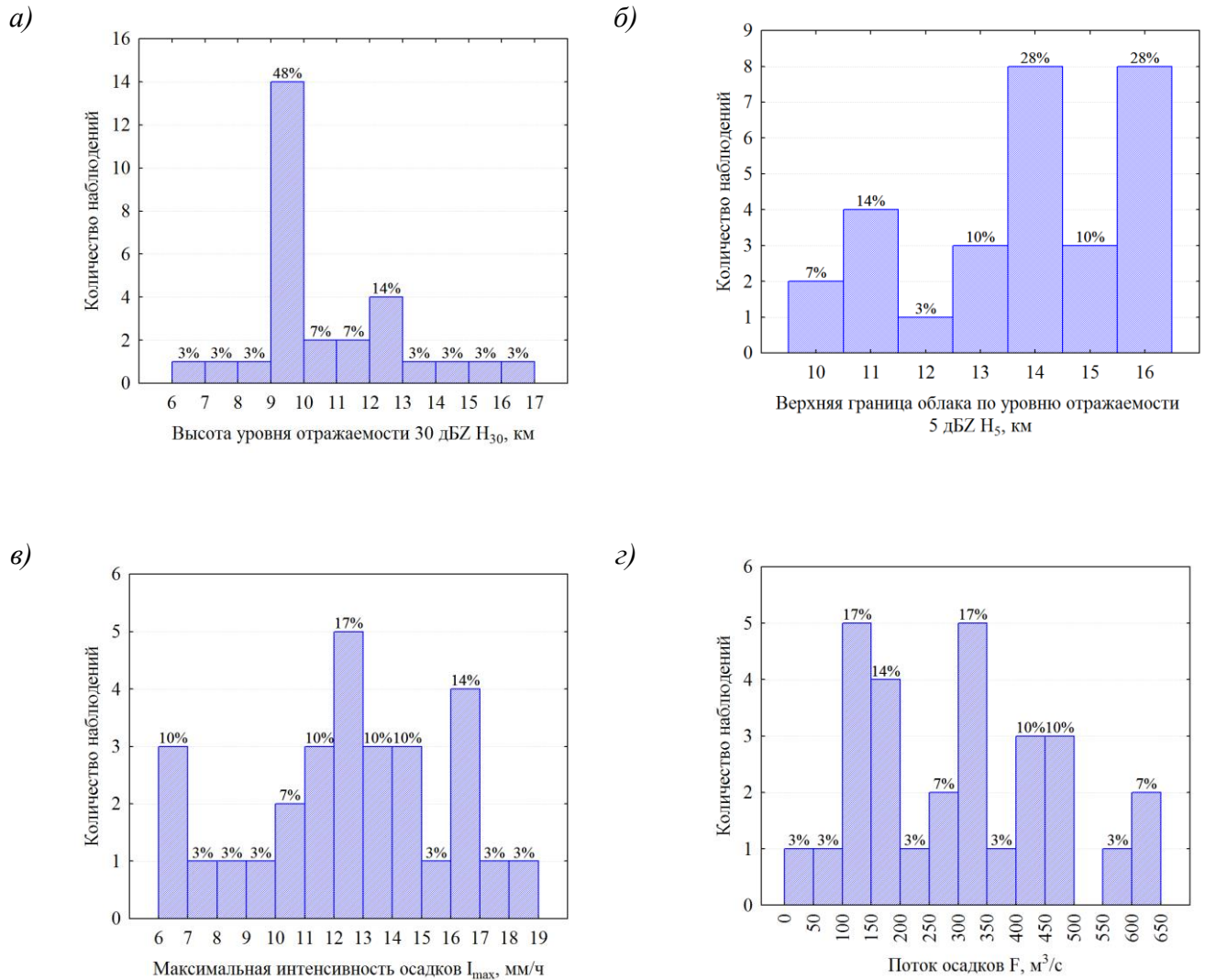


Рисунок А.1 – Гистограммы распределений радиолокационных характеристик грозовых ячеек в рассматриваемом поле облаков (04 октября 2015 года): а) Высота уровня отражаемости 30 дБZ, б) верхняя граница облака по уровню отражаемости 5 дБZ, в) максимальная интенсивность осадков, з) Поток осадков (N – количество ячеек)

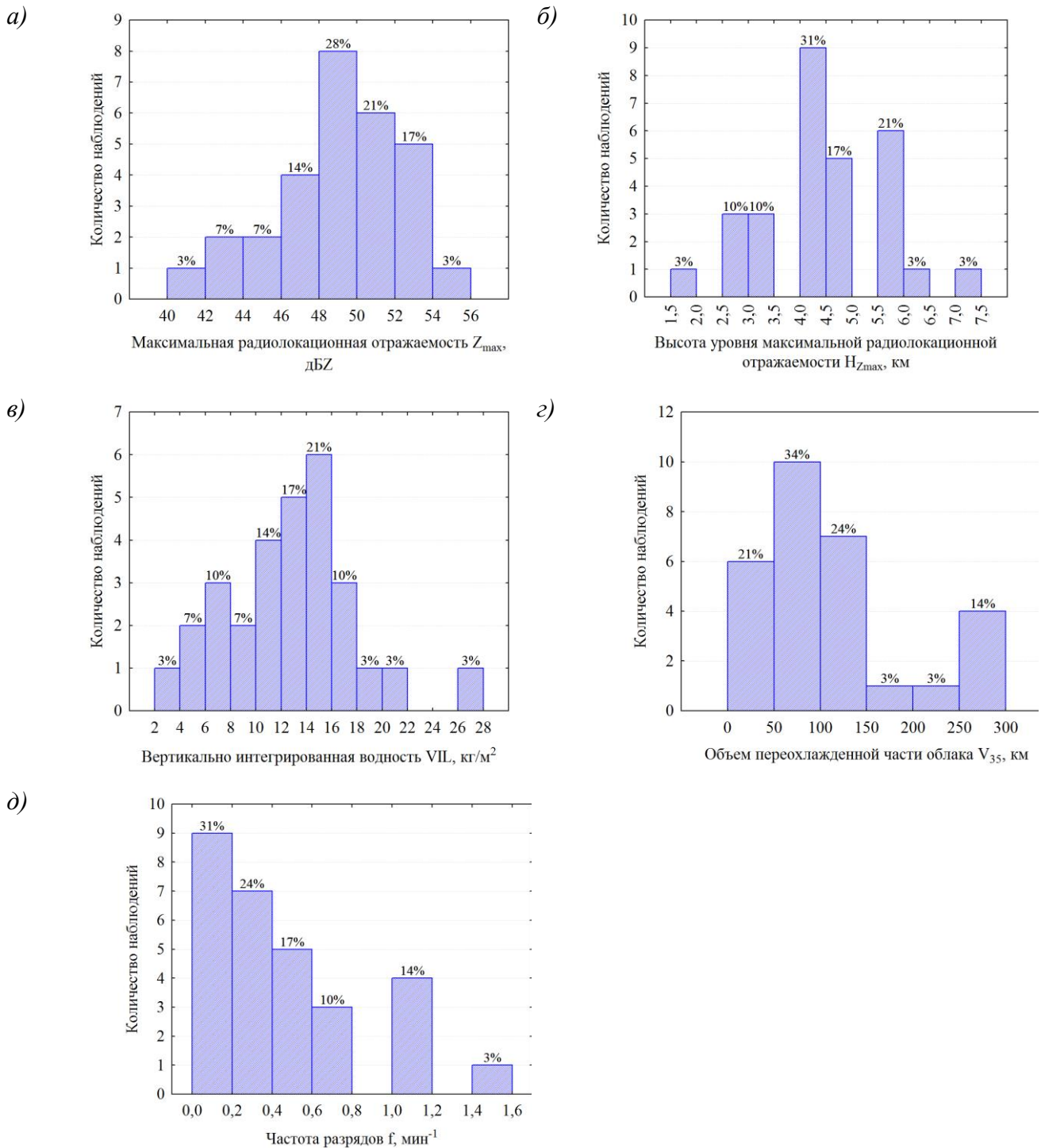


Рисунок А.2 – Гистограммы распределений радиолокационных и электрических характеристик грозных ячеек в рассматриваемом поле облаков (04 октября 2015 года): а) максимальная радиолокационная отражаемости, б) высота расположения уровня максимальной радиолокационной отражаемости, в) вертикально интегрированная водность в облаках, г) объемы переохлажденной части облаков выше изотермы 0°C, превышающих порог отражаемости 35 дБZ и д) частота электрических разрядов (N – количество ячеек)

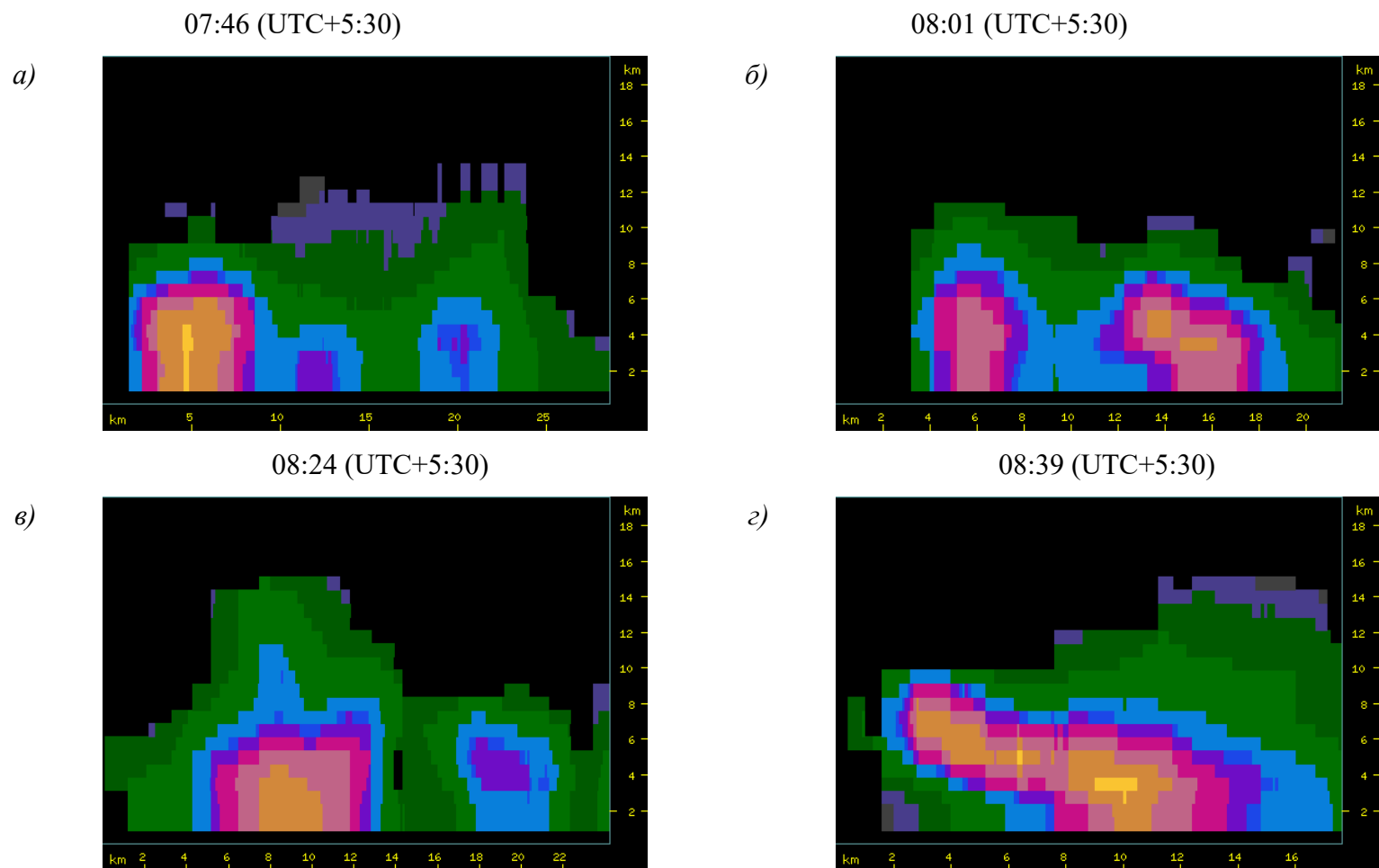
Приложение Б. Вертикальные сечения многоячейкового облака (04.10.2015, штат Махараштра, Индия)

Рисунок Б.1 – Вертикальные сечения многоячейкового грозового облака (радиолокационная отражаемость), развивавшегося 4 октября 2015 г. (штат Махараштра, Индия)

Приложение В. Версии численной нестационарной полуторамерной модели конвективного облака

№	Версия модели	Состав модели	Область применения
1	Базовая модель осадкообразующего конвективного облака	Уравнения гидротермодинамики и переноса субстанций, параметризованное описание микрофизических процессов	Исследование закономерностей эволюции конвективных облаков и связанных с ними осадков в различных физико-географических условиях. Оценка эффектов активных воздействий и совершенствование технологии их осуществления.
2	Модель электризации конвективного облака	То же, что в базовой, а также уравнения переноса электрических зарядов, формула для расчета напряженности электрического поля и параметризованное описание электризации облачных частиц и частиц осадков.	Исследование закономерностей формирования электрической структуры конвективного облака на различных стадиях его жизни и образования грозовых разрядов.
3	Модель конвективного облака, содержащего грубодисперсные аэрозольные примеси	То же, что в модели электризации, а также уравнения переноса грубодисперсных аэрозольных частиц и параметрические выражения описания их взаимодействия с облачными частицами и частицами осадков	Исследования влияния аэрозольных примесей на эволюцию конвективного облака и вымывание аэрозольных частиц осадками на подстилающую поверхность.
4	Физико-статистическая модель	То же, что в базовой, а также эмпирические выражения, описывающие вероятность возникновения и (или) количественные характеристики опасных явлений, связанных с развитием конвективных облаков, на основе их рассчитанных характеристик.	Специализированный краткосрочный прогноз образования и развития конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений (ливни, грозы, град, шквалы, обледенение летальных аппаратов, поражение самолетов молнией, болтанка и др.). В комплексе с крупномасштабными моделями – исследования распределения повторяемости опасных явлений по большой территории [Веремей, Довгальук, Ефимов и др., 2013].

Приложение Г. Основные уравнения трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака

В настоящем разделе приведена система уравнений трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака, с использованием которой выполнен ряд расчетов, приведенных в настоящей диссертации. Полное описание модели дано в работе [110].

Используются следующие условные обозначения:

$c_{\text{air},V}$	–	Теплоемкость сухого воздуха при постоянном объеме, Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹
$c_{v,V}$	–	Теплоемкость водяного пара при постоянном объеме, Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹
$c_{v,p}$	–	Теплоемкость водяного пара при постоянном давлении, Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹
e	–	Элементарный электрический заряд, Кл
$e_{\text{полн}}$	–	Полная энергия среды, приведенная к единице массы, Дж · кг ⁻¹
E_x	–	Составляющая вектора напряженности электростатического поля вдоль оси X, В/м
E_y	–	Составляющая вектора напряженности электростатического поля вдоль оси Y, В/м
E_z	–	Составляющая вектора напряженности электростатического поля вдоль оси Z, В/м
g	–	Ускорение свободного падения, м · с ⁻²
K	–	Динамический коэффициент турбулентности, кг · м ⁻¹ · с ⁻¹
L_{cond}	–	Удельная теплота фазового перехода пар – вода, Дж/кг
L_{subl}	–	Удельная теплота фазового перехода пар – лед, Дж/кг
$N_{\text{ион n}}$	–	Концентрация отрицательных ионов, м ⁻³
$N_{\text{ион p}}$	–	Концентрация положительных ионов, м ⁻³
p	–	Давление среды, Па.
q	–	Общее удельное влагосодержание, кг/кг
q_c	–	Удельное содержание облачных капель, кг/кг
q_i	–	Удельное содержание ледяных осадков, кг/кг
q_{ic}	–	Удельное содержание облачных ледяных кристаллов, кг/кг
q_r	–	Удельное содержание дождевых капель, кг/кг
R_{air}	–	Газовая постоянная сухого воздуха, Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹

R_v	– Газовая постоянная водяного пара, Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹
T	– Температура среды, К
u	– Внутренняя энергия среды, приведенная к единице массы, Дж · кг ⁻¹
$v_{air\ x}$	– Составляющая вектора скорости движения среды вдоль оси X , м/с
$v_{air\ y}$	– Составляющая вектора скорости движения среды вдоль оси Y , м/с
$v_{air\ z}$	– Составляющая вектора скорости движения среды вдоль оси Z , м/с
V_c	– Собственная установившаяся скорость падения облачных капель, м/с
V_i	– Собственная установившаяся скорость падения ледяных осадков, м/с
V_{ic}	– Собственная установившаяся скорость падения облачных ледяных кристаллов, м/с
V_r	– Собственная установившаяся скорость падения дождевых капель, м/с
x	– Декартова координата вдоль оси X , м
y	– Декартова координата вдоль оси Y , м
z	– Декартова координата вдоль оси Z , м
$\alpha_{ion\ n}$	Подвижность отрицательных ионов, м ² · В ⁻¹ · с ⁻¹
$\alpha_{ion\ p}$	Подвижность положительных ионов, м ² · В ⁻¹ · с ⁻¹
Δt	– Шаг по времени, с
Δx	– Шаг по координате x , м
Δy	– Шаг по координате y , м
Δz	– Шаг по координате z , м
μ	– Коэффициент турбулентной вязкости, кг · м ⁻¹ · с ⁻¹
ρ	– Плотность смеси с учетом паровоздушной несущей среды и содержащихся в ней капель воды и частиц льда, кг/м ³
ρ_{air}	– Плотность сухого воздуха, кг/м ³
ρ_v	– Плотность водяного пара, кг/м ³
τ	– Суммарная объемная плотность электрического заряда, Кл/м ³
τ_c	– Объемная плотность заряда облачных капель, Кл/м ³
τ_i	– Объемная плотность заряда ледяных осадков, Кл/м ³
τ_{ic}	– Объемная плотность заряда облачных ледяных кристаллов, Кл/м ³
$\tau_{ion\ n}$	– Объемная плотность заряда отрицательных ионов на единицу массы смеси, Кл/м ³

- $\tau_{i \text{ on p}}$ – Объемная плотность заряда положительных ионов на единицу массы смеси, Кл/м³
- τ_r – Объемная плотность заряда дождевых капель, Кл/м³

Используемые знаки осреднения: «черта» над буквой – осреднение величины по Рейнольдсу, «тильда» — осреднение по Фавру. Обозначения, не приведенные выше, приводятся непосредственно после формул.

Система уравнений модели имеет следующий вид:

1. Уравнение неразрывности:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho} \tilde{v}_{\text{air},x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{\rho} \tilde{v}_{\text{air},y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{v}_{\text{air},z}) = \\ & = \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_c V_c) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_{ic} V_{ic}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_r V_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_i V_i) \end{aligned} \quad (\Gamma.1)$$

Здесь и далее предполагается, что установившиеся скорости падения всех частиц имеют только вертикальную составляющую, поэтому для них индекс z опускается.

2. Уравнение движения несущей среды:

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

;

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

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

В правой части уравнений (Г.2) — (Г.4) стоят объемные силы, действующие на среду: сила барического градиента, электростатическая и гравитационная силы (для последней отлична от нуля только вертикальная составляющая).

3. Уравнение баланса общего влагосодержания:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{q}) + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho} \tilde{q} \tilde{v}_{air,x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\rho} \tilde{q} \tilde{v}_{air,y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{q} \tilde{v}_{air,z}) + \\
& \quad - \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \tilde{q}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial \tilde{q}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \tilde{q}}{\partial z} - \\
& \quad - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{q}_c V_c) - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{q}_r V_r) - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{q}_{ic} V_{ic}) - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{q}_i V_i) = 0
\end{aligned} \tag{Г.5}$$

В левой части уравнения (Г.5) последние четыре слагаемых описывают гравитационное осаждение частиц разных микрофизических фракций. Предполагается, что V_c и V_{ic} равны нулю, а значения V_r и V_i рассчитываются по формулам, аппроксимирующим экспериментальные данные.

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{q}_j) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho} \tilde{q}_j \tilde{v}_{\text{air},x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{\rho} \tilde{q}_j \tilde{v}_{\text{air},y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_j \tilde{v}_{\text{air},z}) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \tilde{q}_j}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial \tilde{q}_j}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \tilde{q}_j}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_j V_{j,z}) = F_j \end{aligned} \quad (\Gamma.6)$$

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

Здесь F_c, F_{ic}, F_r, F_i — источники-стоки облачных капель, дождевых капель, облачных ледяных кристаллов и градин соответственно (микрофизические процессы фазовых переходов влаги и коагуляции облачных элементов).

Удельное содержание водяного пара рассчитывается по формуле:

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

5. Уравнение внутренней энергии:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{v}_{\text{air},x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{v}_{\text{air},y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{v}_{\text{air},z}) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z} = \\ & = -\bar{p} \left(\frac{\partial \tilde{v}_{\text{air},x}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{v}_{\text{air},y}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{v}_{\text{air},z}}{\partial z} \right) + \Phi + \\ & + g \bar{\rho} (V_c \tilde{q}_c + V_{ic} \tilde{q}_{ic} + V_i \tilde{q}_i + V_r \tilde{q}_r) - \\ & - \frac{\partial}{\partial z} \left[\bar{\rho} \tilde{q}_c V_c (L_{\text{cond}} - c_{v,p} \tilde{T}) + \bar{\rho} \tilde{q}_r V_r (L_{\text{cond}} - c_{v,p} \tilde{T}) + \right. \\ & \left. + \bar{\rho} \tilde{q}_{ic} V_{ic} (L_{\text{subl}} - c_{v,p} \tilde{T}) + \bar{\rho} \tilde{q}_i V_i (L_{\text{subl}} - c_{v,p} \tilde{T}) \right] \end{aligned} \quad (\Gamma.7)$$

где Φ — диссипативная функция.

Полная энергия смеси $\tilde{e}_{\text{полн}}$ равна сумме внутренней и кинетической энергий:

$$\tilde{e}_{\text{полн}} = \tilde{u} + \frac{1}{2}(\tilde{v}_{\text{air},x}^2 + \tilde{v}_{\text{air},y}^2 + \tilde{v}_{\text{air},z}^2).$$

Предпоследний член правой части (Г.7) описывает переход кинетической энергии падающих частиц во внутреннюю под действием трения, последний — перенос энергии вниз вследствие оседания частиц.

6. Уравнения состояния:

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \bar{\rho}_{\text{air}} R_{\text{air}} \tilde{T} + \bar{\rho}_v R_v \tilde{T} = \\ &= \bar{\rho} \tilde{T} [(1 - \tilde{q}) R_{\text{air}} + (\tilde{q} - \tilde{q}_c - \tilde{q}_{\text{ic}} - \tilde{q}_r - \tilde{q}_i) R_v] \end{aligned} \quad (\text{Г.8})$$

$$\tilde{T} = \frac{\tilde{u} + (\tilde{q}_c + \tilde{q}_r) L_{\text{cond}} + (\tilde{q}_{\text{ic}} + \tilde{q}_i) L_{\text{subl}}}{(1 - \tilde{q}) c_{\text{air},v} + \tilde{q} c_{v,v} + (\tilde{q}_c + \tilde{q}_{\text{ic}} + \tilde{q}_r + \tilde{q}_i) R_v}. \quad (\text{Г.9})$$

7. Уравнение баланса концентрации положительных и отрицательных ионов, объемной плотности заряда облачных капель, облачных ледяных кристаллов, дождевых капель и кристаллических осадков:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{N}_{\text{ion n}})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [\bar{\rho} \tilde{N}_{\text{ion n}} (\tilde{v}_{\text{air},x} + \alpha_{\text{ion n}} E_x)] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} [\bar{\rho} \tilde{N}_{\text{ion n}} (\tilde{v}_{\text{air},y} + \alpha_{\text{ion n}} E_y)] + \frac{\partial}{\partial z} [\bar{\rho} \tilde{N}_{\text{ion n}} (\tilde{v}_{\text{air},z} + \alpha_{\text{ion n}} E_z)] - \\ &- \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \tilde{N}_{\text{ion n}}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial \tilde{N}_{\text{ion n}}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \tilde{N}_{\text{ion n}}}{\partial z} = M_{\text{ion n}} \end{aligned} \quad (\text{Г.10})$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{N}_{\text{ion p}})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [\bar{\rho} \tilde{N}_{\text{ion p}} (\tilde{v}_{\text{air},x} - \alpha_{\text{ion p}} E_x)] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} [\bar{\rho} \tilde{N}_{\text{ion p}} (\tilde{v}_{\text{air},y} - \alpha_{\text{ion p}} E_y)] + \frac{\partial}{\partial z} [\bar{\rho} \tilde{N}_{\text{ion p}} (\tilde{v}_{\text{air},z} - \alpha_{\text{ion p}} E_z)] - \\ &- \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \tilde{N}_{\text{ion p}}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial \tilde{N}_{\text{ion p}}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \tilde{N}_{\text{ion p}}}{\partial z} = M_{\text{ion p}} \end{aligned} \quad (\text{Г.11})$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{\tau}_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho} \tilde{\tau}_j \tilde{v}_{\text{air},x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\rho} \tilde{\tau}_j \tilde{v}_{\text{air},y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{\tau}_j \tilde{v}_{\text{air},z}) + \\ &- \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \tilde{\tau}_j}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial \tilde{\tau}_j}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \tilde{\tau}_j}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \tilde{\tau}_j V_j) = M_j \end{aligned} \quad (\text{Г.12})$$

где $\tilde{\tau}_j = \{\tilde{\tau}_c, \tilde{\tau}_{ic}, \tilde{\tau}_r, \tilde{\tau}_i\}$, $M_j = \{M_c, M_{ic}, M_r, M_i\}$. 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.

8. Выражение для расчета суммарной плотности электрического заряда:

$$\tilde{\tau} = e\tilde{\tau}_{ion\ n} + e\tilde{\tau}_{ion\ p} + \tilde{\tau}_c + \tilde{\tau}_{ic} + \tilde{\tau}_r + \tilde{\tau}_i. \quad (\Gamma.13)$$

Приложение Д. Результаты трехмерного численного моделирования грозового облака в Китае, Пекин (11 августа 2017 г.)

В расчетах с учетом аэрозольного загрязнения атмосферы, помимо порога автоконверсии (параметризация Кесслера) варьировались параметры распределения дождевых капель и градин по размерам, определяемые функцией распределения Маршалла – Пальмера:

$$dN_r(D_r) = N_{0r} e^{-\Lambda_r D_r} dD_r, \quad dN_i(D_i) = N_{0i} e^{-\Lambda_i D_i} dD_i,$$

где $N_r(D_r)$ и $N_i(D_i)$ – счетная концентрация дождевых капель радиуса D_r и градин радиуса D_i соответственно, N_{0r} и N_{0i} – независимые параметры, а Λ_r и Λ_i – зависимые параметры, определяемые по следующим формулам:

$$\Lambda_r = (\pi \rho_{wat} N_{0r} \rho_a q_r)^{1/4}, \quad \Lambda_i = (\pi \rho_{ice} N_{0i} \rho_a q_i)^{1/4},$$

где ρ_a , ρ_{wat} , и ρ_{ice} – плотности воздуха, воды и льда соответственно, q_r и q_i – удельное содержание дождевых капель и градин соответственно.

При уменьшении значений N_{0r} (N_{0i}), спектр размеров дождевых капель (градин) сдвигается в сторону увеличения и, соответственно, наоборот.

Таким образом, варьирование параметров $q_{с\text{криг}}$, N_{0r} (N_{0i}) в расчетах задавалось аэрозольное загрязнение. Помимо этого, был выполнен расчет с базовыми параметрами. Значения варьируемых параметров и их сочетаний в расчетах приведены в Таблице Д.1.

Анализировались следующие параметры облаков (приведены в таблицах ниже): $H_{вг}$ – высота верхней границы облака, w – скорость восходящего потока, Q_c и Q_R – водность облачных и дождевых капель, Q_i и Q_{ic} – ледность градин и облачных кристаллов, i_r и i_i – интенсивность выпадения дождя и града на подстилающей поверхности, f – частота электрических разрядов. Максимальные значения параметров при различных конфигурациях расчетов приведены в табл. Д.2 и Д.3

Таблица Д.1 – Параметры расчетов для учета влияния аэрозольного загрязнения

Расчет	$q_{с\ крит} \rho_a, \text{ Г/см}^3$	$N_{0r}, \text{ см}^{-4}$	$N_{0i}, \text{ см}^{-4}$
Базовый расчет	$5,0 \cdot 10^{-7}$	0,08	0,006
Серия расчетов 1	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0,08	0,006
	$1,5 \cdot 10^{-6}$		
	$2,0 \cdot 10^{-6}$		
	$2,5 \cdot 10^{-6}$		
	$5,0 \cdot 10^{-6}$		
Серия расчетов 2	$5,0 \cdot 10^{-7}$	0,16	0,006
		0,24	
		0,32	
		0,64	
Серия расчетов 3	$5,0 \cdot 10^{-7}$	0,08	0,012
			0,018
			0,024
			0,03
			0,06

Таблица Д.2 – Изменение основных параметров облака и осадков при варьировании параметра N_{0r}

Величина	$N_{0r}, \text{см}^{-4}$				
	0,08	0,16	0,24	0,32	0,64
$\max_t H_{\text{вг}}, \text{км}$	16,9	16,9	16,9	17,1	16,9
$\max_{x,y,z,t} w, \text{м/с}$	53,9	55,1	55,0	54,8	53,8
$\max_{x,y,z,t} Q_c, \text{г/м}^3$	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7
$\max_{x,y,z,t} Q_r, \text{г/м}^3$	6,0	6,7	7,2	7,6	8,5
$\max_{x,y,z,t} Q_i, \text{г/м}^3$	8,5	10,6	11,0	11,6	13,2
$\max_{x,y,z,t} Q_{ic}, \text{г/м}^3$	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
$\max_{x,y,t} i_r, \text{мм/ч}$	138,9	139,9	138,7	138,0	132,9
$\max_{x,y,t} i_i, \text{мм/ч}$	0,1	0,1	0,2	0,3	0,7
$\max_t f, \text{мин}^{-1}$ (в пересчете на интервалы 6 мин)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
N	28	28	28	28	28

Таблица Д.3 – Изменение основных параметров облака и осадков при варьировании параметра N_{0i}

Величина	$N_{0i}, \text{см}^{-4}$					
	0,006	0,012	0,018	0,024	0,03	0,06
$\max_t H_{\text{вг}}, \text{км}$	16,9	17,3	17,3	17,3	17,3	17,5
$\max_{x,y,z,t} w, \text{м/с}$	53,9	55,5	57,2	58,6	59,8	62,2
$\max_{x,y,z,t} Q_c, \text{г/м}^3$	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4
$\max_{x,y,z,t} Q_r, \text{г/м}^3$	6,0	5,1	4,5	4,1	3,8	3,0
$\max_{x,y,z,t} Q_i, \text{г/м}^3$	8,5	6,8	6,0	5,7	5,4	3,1
$\max_{x,y,z,t} Q_{ic}, \text{г/м}^3$	2,7	2,7	2,7	2,9	3,0	4,6
$\max_{x,y,t} i_r, \text{мм/ч}$	138,9	112,8	95,0	77,0	66,5	44,2
$\max_{x,y,t} i_i, \text{мм/ч}$	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\max_t f, \text{мин}^{-1}$ (в пересчете на интервалы 6 мин)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
N	28	29	28	28	27	27

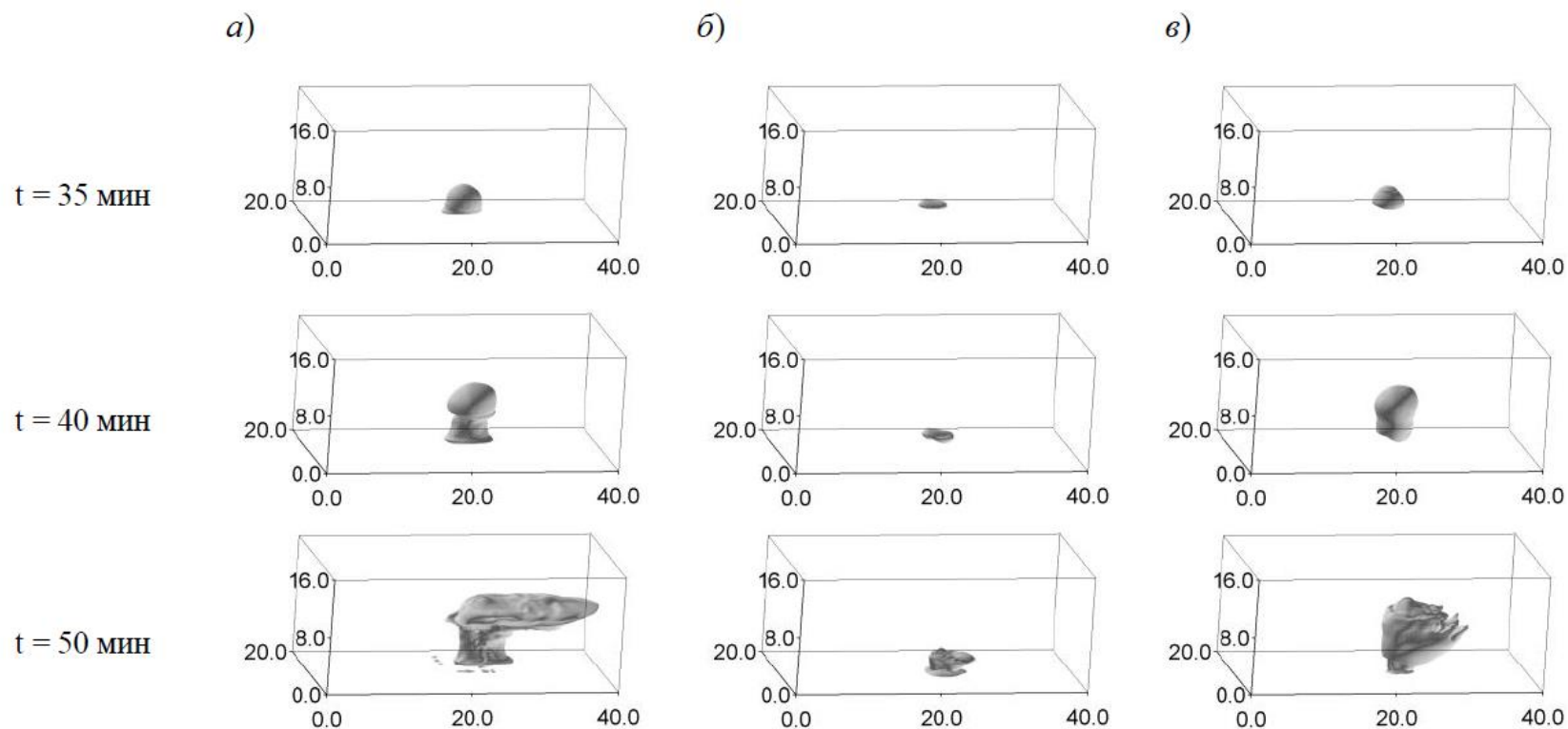
Приложение Е. Результаты трехмерного численного моделирования грозо-градового облака в Санкт-Петербурге (22 июля 2017 г.)

Рисунок Е.1 – Результаты расчета с учетом гетерогенного замерзания капель (случай Б). Изоповерхности ($0,1 \text{ г/м}^3$) облачных фракций в различные моменты времени (t): суммарной водности облачных капель и ледяных кристаллов (а), водности дождевых капель (б), ледности градин (в) [122]

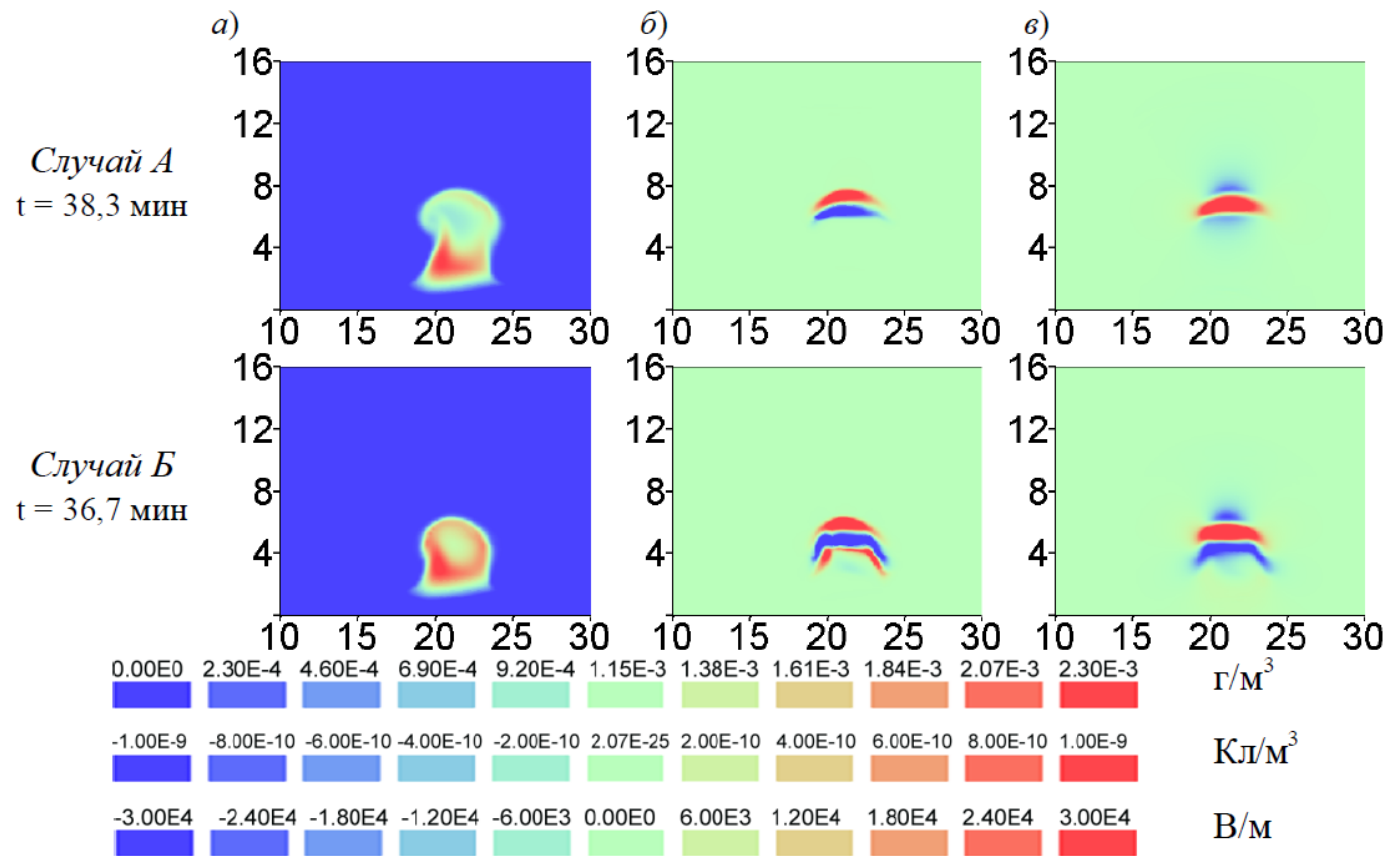


Рисунок Е.2 – Вертикальное сечение облака за несколько мин до начала разрядов: суммарная водность облачных капель и ледяных кристаллов (а), объемная плотность электрического заряда (б), вертикальная составляющая вектора напряженности электрического поля (в) [122]

Приложение Ж. Акты внедрения



В.М.Катцов

201_г.



В.Н.Зенкевич

06 2018 г.

АКТ №__

о внедрении результата НИР по теме: «Предоставление
информационно-аналитических данных по структурам
электрических полей облаков», выполненной в ФГБУ «ГГО»
в период 2018 г.
(годы выполнения)

Настоящий акт составлен в том, что результат темы – данные об электрических
полях в атмосфере, полученные с помощью самолетов-лабораторий, внедрены в
ПАО «НПП «Импульс».
(название внедрившей организации)

Для научно-исследовательских целей.
(цель внедрения)

Эффект от внедрения – научно-технический.

Представители ФГБУ «ГГО»:

гнс, дтн, Синькевич А.А.

внс, кфмн, Михайловский Ю.П.

Представители ПАО «НПП «Импульс»

гнс - начальник отделения ЛЭСКБ

/ Лашовский А.Е.

старший инженер-конструктор

Редюкова / Редюков М.С.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «ГГО»

В. М. Катцов

«—» апреля 2022 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что программа визуализации результатов расчетов по трехмерной нестационарной модели конвективных облаков, предназначенная для использования в программном пакете Matlab, практически применялась в ходе выполнения научно-исследовательских работ, полученных научно-исследовательским учреждением Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) в 2021 году.

Результат визуализации расчетов приведен в отчете о научно-исследовательской работе по теме 6.2.1 «Развитие технологии активных воздействий на градовые процессы» (промежуточный, этап 2) за 2021 год.

Заведующий ОГМИ

Гл. научн. сотр.

И. А. Тарабукин

А. А. Синькевич

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «ГГО»

В. М. Катцов

« » апреля 2022 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что разработанная программа визуализации результатов расчетов по трехмерной нестационарной модели конвективных облаков, предназначенная для использования в программном пакете Matlab, практически применялась в ходе выполнения научно-исследовательских работ, финансируемых Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках выполнения гранта: «Исследование связи между характеристиками и структурой грозовых облаков с различными характеристиками окружающей среды для разных районов Земли» (Брик_т 18-55-80020).

Результат визуализации расчетов приведен в публикации, выполненной в рамках выполнения гранта:

Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Довгалоук 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 (Переводная версия - Mikhailovsky, Y.P., Toropova, M.L., Veremey, N.E. et al. Dynamics of the Electrical Structure of Cumulonimbus Clouds. Radiophys Quantum El 64, 309–320 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11141-022-10133-y>).

Заведующий ОГМИ

И. А. Тарабукин

Гл. научн. сотр.

А. А. Синькевич

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «ВНИИСХМ»

 В.А. Долгий-Грач

«22 июля» 2025



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что численная нестационарная трехмерная модель конвективного облака (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019666622: «Численная нестационарная трехмерная модель системы взаимодействующих конвективных облаков с возможностью параллельных вычислений. Версия 2019.01» / Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Игнатъев А.А., Пастушков Р.С., Торопова М.Л.; заявитель и правообладатель ФГБУ «ГГО»; № 2019665300; заявл. 26.11.2019; опубл. 12.12.2019) передана в ФГБУ «ВНИИСХМ» для использования при выполнении научно-исследовательских работ Росгидромета.



УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
ФГБУ «НПО «Тайфун» - директор ИЭМ

А.А. Юдаков

А К Т /2025

использования (внедрения) объекта учета (результата научно-технической деятельности), полученного за счет средств федерального бюджета при выполнении научно-исследовательской, опытно-конструкторской или технологической работы гражданского назначения

25.05.2025

г.Обнинск

Комиссия в составе:
председатель –

зам. директора ИЭМ по научной работе Иванов В.Н.,

члены комиссии – представители подразделения (подразделений), в которых использованы (внедрены) результаты научно-технической деятельности (РНТД):

и.о. зав лабораторией № 4 ИЭМ Савченко А.В. и ведущий научный сотрудник лаборатории № 1 ИЭМ Моргунов Ю.А.

составили настоящий акт о том, что численная нестационарная трехмерная модель конвективного облака (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019666622: «Численная нестационарная трехмерная модель системы взаимодействующих конвективных облаков с возможностью параллельных вычислений. Версия 2019.01» / Веремей Н.Е., Довгалою Ю.А., Игнатьев А.А., Пастушков Р.С., Торопова М.Л.; заявитель и правообладатель ФГБУ «ГГО»; № 2019665300; заявл. 26.11.2019; опублик. 12.12.2019) передана ФГБУ «ГГО» в НПО «Тайфун» для использования при выполнении научно-исследовательских работ Росгидромета.

Численная нестационарная трехмерная модель системы взаимодействующих конвективных облаков с марта 2025 г. используется для расчета пространственно-временных эволюции конвективных облаков при введении в них искусственных ядер конденсации.

Наименование продукции (услуги), в которой использован объект учета:

Разработка и испытания средств активного воздействия на атмосферные процессы.

Эффект от использования (внедрения)

Регулярное использование (внедрение) объекта учета (РНТД) позволяет: моделировать пространственно-временное распределение капельных частиц при применении средств активного воздействия.

Председатель комиссии

Иванов В.Н.

Члены комиссии:

Савченко А.В.

Моргунов Ю.А.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что программа анализа и визуализации временных рядов экстремальных по пространству характеристик конвективного облака (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683537 «Постобработка и визуализация результатов трехмерного численного моделирования облачной конвекции «Extremum visualizer» Версия 1.0; № 2024682917: заявл. 02.10.2024 : опубл. 14.10.2024 / Г. Д. Федотова, М. Л. Торопова, Н. Е. Веремей; заявитель ФГБУ «ГГО») практически применялась научно-исследовательским учреждением Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) – ФГБУ «ГГО». Программа была использована в ходе выполнения научно-исследовательских работ в 2024 году по разделу НИТР 6.2.1 «Развитие технологии активных воздействий на градовые процессы».

Заведующий ОГМИ

Гл. научн. сотр.

И. А. Тарабукин

А. А. Синькевич