

УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального государственного  
бюджетного учреждения «Главная  
геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»)



В.М. Катцов

«30» марта 2026 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»)

Диссертационная работа Тороповой Марины Леонидовны «Исследование грозовых облаков по данным дистанционных измерений и численного моделирования» в отделе геофизического мониторинга и исследований федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (далее – ФГБУ «ГГО»).

В 2016 году Торопова М.Л. получила степень магистра по направлению «Гидрометеорология» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

В 2013 году Торопова М.Л. поступила на работу в отдел физики облаков и атмосферного электричества (в последующем отдел геофизического мониторинга и исследований) на должность геофизика ФГБУ «ГГО». В настоящее время является старшим научным сотрудником, в должности заведующего лабораторией физики облаков.

В 2026 году прикрепилась для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук без освоения программы подготовки научных и научно-педагогических кадров к аспирантуре ФГБУ «ГГО».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 445/АС-109 выдана 09.02.2026 ФГБУ «ГГО».

Научный руководитель – Синькевич Андрей Александрович, доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУ «ГГО».

По итогам выполненной соискателем работы принято следующее **заключение**:

**Оценка выполненной соискателем работы.** Диссертационная работа Тороповой М.Л. представляет собой завершенное, самостоятельно выполненное научное исследование. Работа выполнена лично диссертантом под руководством научного руководителя, доктора технических наук Синькевича А.А. Поставленные цель и задачи полностью достигнуты. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая по своему содержанию, объему и оформлению полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

**Актуальность исследования** характеристик грозовых облаков определяется недостаточной изученностью вопроса. В настоящий момент остаются не до конца ясными механизмы, приводящие к электризации конвективных облаков и формированию молний. Комплексные исследования процесса перехода в грозовую стадию по данным

дистанционных измерений и численного моделирования позволяют получить новые знания в этой области и перейти к более точным методам прогноза грозы.

**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 поставленной цели был выполнен ряд научных и методических задач:

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.

**Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.** Личный вклад автора состоит в определении цели работы, постановке и решении задач, а также в выборе объекта и предмета исследования. Детально исследованы данные радиолокационных измерений грозовых облаков в различных регионах, определены основные тенденции изменения характеристик при начале электрических разрядов. Выполнены расчеты при помощи трехмерной численной модели при различных начальных и граничных условиях, исследовано влияние на электризацию активных воздействий, механизма гетерогенного замерзания капель, аэрозольного загрязнения, эволюция структуры заряда в облаке и пространственных полей динамических и микрофизических характеристик. Выполнен анализ результатов трехмерного численного моделирования, по итогам которого получены характеристики облаков при переходе в грозовую стадию. Выполнен анализ возможных ошибок в данных температурно-влажностного строения атмосферы при использовании региональных численных моделей прогноза погоды. Разработана и апробирована методика ансамблевого прогноза характеристик грозовых облаков.

Научные результаты диссертационного исследования, полученные лично соискателем, заключаются в следующем:

1. Получены статистические характеристики грозовых облаков в Индии в период действия муссона и в постмуссонный период. Показано, что для облаков муссонного периода характерна невысокая грозовая активность, относительно небольшие значения максимальной радиолокационной отражаемости грозовых облаков, переохлажденных объемов облака с высокими значениями отражаемости и ряда других параметров.
2. Оценены основные тенденции изменения характеристик облаков Индии (в муссонный и постмуссонный периоды) при переходе облаков в грозовую стадию.

Показано, что важным отличием от тенденций, наблюдаемых в других регионах, является уменьшение ряда радиолокационных параметров при начале электрических разрядов.

3. Получено, что частота разрядов может быть тесно связана с различными радиолокационными характеристиками облаков. Такие связи отсутствовали для полей облаков в Индии, но присутствовали для ряда рассмотренных временных рядов эволюции облаков. Построены модели линейной регрессии и показано, что выявленные связи в большинстве случаев не могут быть аппроксимированы такими моделями, что указывает на их нелинейность.

4. По результатам трехмерного численного моделирования выполнено обобщение характеристик облаков при переходе в облака в грозовую стадию. Показано, что высота верхней границы облаков при этом может составлять 5,3 км (минимальное из всех полученных значений), скорость восходящего потока – 14 м/с, водность дождевых капель и крупных ледяных частиц – 0,8 и 2,4 г/м<sup>3</sup> соответственно, могут отсутствовать выпадающие из облака осадки.

5. С использованием трехмерной численной модели показано, что активные воздействия на облако кристаллизующим реагентом могут приводить к ускорению перехода в грозовую стадию, усилению молниевой активности, формированию инвертированной структуры зарядов. Показано, что одним из путей совершенствования методов воздействий на облака льдообразующим реагентом может быть учет температурных возмущений внутри облака и использование уточненной методики определения слоя внесения реагента.

6. Получены характеристики полей электрических, микрофизических и динамических характеристик в ходе эволюции облака. Показано, что на начальном этапе электризации в облаке образуется двухслойная структура заряда, которая перед началом разрядов трансформируется в трехслойную. При дальнейшем развитии облака формируются дополнительные области заряда, малые по вертикальной мощности. Показано расположение основных восходящих потоков в облаке на различных стадиях развития и области формирования нисходящих потоков, сильнейшие из которых связаны с выпадающими осадками. Продемонстрировано, что при начале разрядов наибольшие значения объемной плотности заряда связаны с градом и крупой.

7. Разработана и апробирована методика прогноза характеристик грозových облаков на базе модели конвективного облака малой размерности. Показано, что на внесение возмущений в начальные данные (температурно-влажностное строение атмосферы) сильнее всего реагируют микрофизические характеристики облаков и их функции (радиолокационная отражаемость). Верификация по данным радиолокационных наблюдений показала хорошее соответствие данных моделирования и измерений. Обоснованием для методики, среди прочего, являются результаты выполненного соискателем сравнения воспроизведения температурно-влажностного строения атмосферы, полученного с помощью модели WRF, с данными аэрологического зондирования.

По итогам диссертационного исследования были достигнуты следующие основные результаты:

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

2. Показано, что характеристики грозových облаков в Индии значительным образом различаются для различных режимов циркуляции: муссонного и постмуссонного. В муссонный период облака имеют малую (относительно постмуссонного) высоту верхней

границы, радиолокационную отражаемость, переохлажденные объемы облака и другие параметры.

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

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

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

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

7. 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/м<sup>3</sup>, ледность облачных ледяных кристаллов и градин – 0,9 и 4,0 г/м<sup>3</sup>.

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

**Обоснованность и достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается:

- строгой постановкой задач, актуальностью и применяемыми методами;
- большим объемом выборки анализируемых данных натуральных измерений;
- отсутствием противоречий между результатами численного моделирования и соответствующими данным по литературным источникам;

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в комплексном исследовании микрофизических и электрических характеристик конвективных облаков различных регионов, в том числе в условиях муссонного климата, а именно:

1. Впервые выполнен анализ эволюции характеристик конвективных облаков при их переходе в грозовую стадию применительно к муссонному и постмуссонному периодам. Установлено, что сезонная изменчивость параметров облаков в регионе Индии существенно отличается от аналогичных зависимостей, характерных для других географических регионов.

2. Выявлены и систематизированы характеристики грозовых облаков и разрядов для муссонного и постмуссонного сезонов в Индии. Показано, что данные параметры обнаруживают значительную сезонную зависимость и обладают региональной спецификой при сопоставлении с другими районами Земного шара.

3. Впервые проведено обобщение серии численных экспериментов с использованием трехмерной нестационарной модели конвективного облака, позволившее определить критические значения характеристик облака, соответствующие моменту его перехода в грозовую стадию.

#### **Теоретическая и практическая значимость** диссертационной работы:

1. Полученные новые данные о характеристиках грозовых облаков в различные сезоны на территории России и Индии создают эмпирическую базу для совершенствования физико-статистических моделей электризации.

2. Установлены существенные различия в механизмах электризации облаков в Индии в зависимости от сезона муссона. Показано, что в отличие от регионов РФ и других районов мира, где ведущую роль играют крупные ледяные частицы, в условиях активного Индийского муссона доминирующими факторами, по всей видимости, становятся мощные восходящие потоки и мелкие ледяные частицы. Полученные результаты уточняют теоретические представления о роли различных физических процессов в генерации грозовой активности.

3. Впервые обобщены результаты серии численных расчетов с использованием трехмерной нестационарной модели, позволившие определить пороговые значения характеристик облака при его переходе в грозовую стадию. Получены новые сведения о динамике электрических и микрофизических полей в облаке.

В совокупности результаты работы расширяют фундаментальные знания о процессах электризации, формировании электрической структуры конвективных облаков и их связи с возникновением и интенсивностью молниевых разрядов.

#### **Научная специальность**, которой соответствует диссертация.

Содержание диссертации Тороповой М.Л. «Исследование грозовых облаков по данным дистанционных измерений и численного моделирования» соответствует паспорту специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате, область исследования диссертанта отражает основные структурные компоненты научной специальности:

п. 1. Методы наблюдений, измерений и обработки данных об атмосфере и климатической системе.

п. 4. Приземный и пограничный слой. Строение и физика нижней атмосферы (тропосферы) Земли.

п. 7. Электрические явления в атмосфере. Ток. Градиент потенциала. Грозное электричество. Молнии. Электризация облаков.

п. 10. Тропическая метеорология.

п. 11. Конвективные процессы в атмосфере.

п. 14. Гидродинамические, физико-статистические методы, модели и технологии прогноза состояния атмосферы различной заблаговременности, включая сверхкраткосрочные прогнозы.

п. 15. Активные воздействия на гидрометеорологические и геофизические процессы и явления.

**Соответствие диссертации требованиям п. 14 Положения о присуждении ученых степеней.** Текст диссертации был проверен в системе «Антиплагиат». Итоговая оригинальность текста диссертации составила 84,24%. Диссертация содержит 0,29% цитирований; 10,06% — самоцитирований; 5,41% — совпадения.

**Сведения об опубликованных работах.** 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.

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

1. Торопова М.Л., Русин И.Н. Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW // Труды ГГО. 2019. Вып. 593. С. 160–176.
2. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л. Исследование динамики электрической структуры грозоградового кучево-дождевого облака по данным трехмерного численного моделирования (на примере северо-запада России) // Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 7–22.
3. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Торопова М. Л., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П. Численное моделирование влияния электрических процессов на формирование опасных явлений погоды, связанных с конвективными облаками // Труды ГГО. 2019. Вып. 595. С. 63-82.
4. Михайловский Ю. П., Синькевич А. А., Абшаев А. М., Торопова М. Л. О методах воздействия на электрические процессы в облаках // Труды ГГО. 2021. Вып. 602. С. 6–22.
5. Торопова М. Л. Параметры конвективных облаков при переходе в грозовую стадию по данным трехмерного численного моделирования // Труды ГГО. 2021. Вып. 602. С. 23–41.
6. Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П., Куров А. Б., Синькевич А. А. Прогноз развития 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., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Михайловский Ю. П., Богданов Е. В., Торопова М. Л., Игнатъев А. А., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М., Гопалакришнан В., Муругавел П., Павар С. Д. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака // Метеорология и гидрология. 2017. №8. С. 18 – 28.
9. Попов В.Б., Синькевич А.А., Янг Дж., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. Характеристики и структура кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Финским заливом // Метеорология и гидрология. 2020. №9. С. 5-16.
10. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Попов В.Б., Лу Дж., Янг Дж. Исследования механизмов электризации и связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками грозового облака в Китае // Метеорология и гидрология. 2020. №10. С. 63-72.
11. Синькевич А.А., Торопова М.Л., Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Павар С., Гопалакришнан В. Особенности взаимосвязей электрических и радиолокационных параметров грозových облаков в Индии (натурные исследования) // Метеорология и гидрология. 2021. №6. С. 99-106.
12. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Янг Д., Сун М. Влияние сильного аэрозольного загрязнения воздуха на эволюцию конвективных облаков во время грозы в Китае по результатам трехмерного численного моделирования // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 55-67.

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

**Публикации в других рецензируемых изданиях:**

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

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

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

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

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

19. Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Синькевич А.А., Янг Дж., Лу Дж. Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков // Известия вузов: Радиофизика. 2021. №5. С. 341-353. doi: 10.52452/00213462\_2021\_64\_05\_341.

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

Основные результаты исследования и материалы диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. III Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» (Санкт-Петербург, 2019)

2. VI Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, 2020)

3. IV Международная научная конференция ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ, КЛИМАТОЛОГИИ И МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (Ставрополь, 2022)

4. VI Международная конференция "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л. Н. Карлина / MGO-2022» (Санкт-Петербург, 2022)

5. II Международная научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития» (Санкт-Петербург, 2024)

6. Всероссийская открытая конференция по исследованиям атмосферных и склоновых стихийных явлений в условиях современного изменения климата, посвященной 190-летию создания гидрометеорологической службы России и 90-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР (Нальчик, 2024)

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

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

Диссертация Тороповой Марины Леонидовны «Исследование грозовых облаков по данным дистанционных измерений и численного моделирования» является самостоятельной, новой по постановке и решению ряда вопросов работой, отвечающей требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате, требованиям п.п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Заключение принято на заседании ученого совета ФГБУ «ГГО».

В заседании ученого совета принимали участие 21 члена совета, в том числе 3 доктора физико-математических наук и 17 кандидатов.

Результаты голосования: за – 21 чел., против – 0 чел., воздержалось – 0 чел.

Решение принято единогласно, протокол № 2 от 25 марта 2026 г. заседания ученого совета федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова».

Ученый секретарь,  
кандидат географических наук



И.Н. Шанина

Контактная информация:

194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7.

Телефон: +7 (812) 297-43-90; электронный адрес: [director@voeikovmgo.ru](mailto:director@voeikovmgo.ru)