

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Тороповой Марины Леонидовны** на тему «Исследование грозовых облаков по данным дистанционных измерений и численного моделирования», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности **1.6.18. Науки об атмосфере и климате**

### **Актуальность темы исследования**

Диссертационная работа М.Л. Тороповой посвящена комплексному исследованию характеристик грозовых облаков с использованием данных радиолокационных и грозопеленгационных измерений, а также численного моделирования. Гроза остаётся одним из наиболее опасных и наименее предсказуемых явлений погоды, ежегодно приводящим к человеческим жертвам и значительному экономическому ущербу. Ситуация осложняется наблюдаемыми климатическими изменениями, проявляющимися, в том числе, в изменении частоты и интенсивности гроз в различных регионах планеты, а также в трансформации их географического распределения.

Несмотря на длительную историю изучения грозовой активности, до настоящего времени механизмы электризации облаков и условия возникновения грозовых разрядов изучены не в полной мере, а методы прогноза грозы и связанных с ней опасных явлений (град, ливневые осадки, шквалы) обладают существенными ограничениями. Особенно остро это проявляется при сопоставлении данных, полученных в различных климатических зонах: характеристики облаков и условия их электризации в умеренных и тропических широтах могут существенно различаться, а универсальные предикторы грозовой активности зачастую плохо работают за пределами регионов, для которых они были разработаны.

В этих условиях особую ценность приобретают сравнительные исследования, опирающиеся на сопряжённое использование натуральных наблюдений и численного моделирования различной сложности. Именно такая комплексная постановка задачи реализована в работе соискателя. Привлечение редких натуральных материалов по тропическим грозам Индии (штаты Карнатака и Махараштра), сопоставление их с данными по Северо-Западному и Северо-Кавказскому регионам России, а также параллельное использование трёхмерной нестационарной модели конвективного облака и модели малой размерности для проведения ансамблевых расчётов, делают тему диссертации актуальной как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения, отвечающей современному состоянию и тенденциям развития физики облаков и атмосферного электричества.

### **Оценка содержания диссертации.**

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены предмет и объект исследования, представлены положения, выносимые на защиту, охарактеризованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методология, личный вклад соискателя, апробация результатов и публикации.

**Первая глава** представляет собой аналитический обзор современного состояния исследований конвективной неустойчивости атмосферы, радиолокационных и электрических характеристик грозовых облаков, а также подходов к численному моделированию грозовой активности. Систематизированы используемые в литературе оценки конвективной неустойчивости (CAPE, K-index, индексы Шоултера и др.), радиолокационные предикторы грозы (содержание крупы, объёмы переохлаждённой части облака с высокой отражаемостью, удельная дифференциальная фаза). Отдельное внимание уделено электрической структуре грозовых облаков, методам её диагностики и численного моделирования. По итогам обзора корректно определены пробелы в существующих исследованиях, к которым относятся, прежде всего, недостаток сравнительных региональных исследований характеристик облаков, переходящих в грозовую стадию, и редкость работ, в которых одновременно воспроизводится весь комплекс параметров облака (термодинамические, микрофизические, электрические).

**Вторая глава** посвящена результатам обработки данных радиолокационных наблюдений и систем регистрации грозовых разрядов для трёх регионов: Северо-Запад РФ (ДМРЛ-С, Воейково; Blitzortung), Северный Кавказ (МРЛ-5, Ставрополь; LS8000) и Индия (WR-100, штаты Махараштра и Карнатака; Maharashtra LLN). Получены детальные статистические характеристики грозовых облаков, отдельно для муссонного и постмуссонного периодов. Показано, что облака тропических широт могут достигать высот до 17 км, однако обладают сравнительно небольшими значениями максимальной радиолокационной отражаемости (медианы 40–50 dBZ) и переохлаждённых объёмов с отражаемостью более 35 dBZ. Установлено, что единственным радиолокационным параметром,

демонстрирующим статистически значимые изменения при переходе в грозовую стадию во всех трёх регионах, является высота верхней границы облака. Существенным результатом, имеющим самостоятельное научное значение, является обнаруженное уменьшение ряда параметров (отражаемости, высоты верхней границы и др.) при начале разрядов в тропических облаках, что отличается от поведения облаков умеренных широт. Регрессионный анализ показал наличие сильных, но в большинстве случаев нелинейных связей частоты разрядов с радиолокационными параметрами облаков, что подтверждается высокими значениями рангового коэффициента Спирмена (до 0,94 для dV35) при недостаточном качестве моделей линейной регрессии.

**Третья глава** содержит результаты численного моделирования грозовых облаков с использованием двух моделей — полуторамерной (малой размерности) и трёхмерной нестационарной модели конвективного облака, разработанных при участии коллектива ФГБУ «ГГО». Рассмотрены конкретные случаи развития облаков на Северном Кавказе, в Санкт-Петербурге и Китае (Пекин), исследовано влияние гетерогенного замерзания капель, аэрозольного загрязнения и активных воздействий льдообразующим реагентом. Впервые выполнено обобщение серии расчётов и получены статистические характеристики облаков при переходе в грозовую стадию (медианы): высота верхней границы 6,6 км, скорость восходящего потока 20,9 м/с, водность облачных и дождевых капель 1,8 и 2,8 г/м<sup>3</sup>, ледность облачных ледяных кристаллов и крупных ледяных частиц 0,9 и 4,0 г/м<sup>3</sup>. Показано, что активные воздействия льдообразующим реагентом ускоряют переход облака в грозовую стадию и могут приводить к формированию инвертированной структуры заряда. Отдельный раздел главы посвящён воспроизведению стратификации атмосферы мезомасштабной моделью WRF и оценке отклонений модельных значений температуры и температуры точки росы от данных аэрологического зондирования. На основе этих результатов разработаны и апробированы две методики ансамблевого прогноза параметров грозовых облаков с использованием модели малой размерности, в которых возмущения вносятся либо только в приземные значения, либо на всех вертикальных уровнях. Показано, что наиболее чувствительными к возмущениям оказываются микрофизические характеристики облаков и их функции (в первую очередь максимальная радиолокационная отражаемость).

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования. Приложения содержат гистограммы распределений радиолокационных и электрических характеристик облаков (Индия, штат Махараштра), вертикальные сечения многоячейкового облака, описание версий полуторамерной модели, основные уравнения трёхмерной нестационарной модели, дополнительные результаты моделирования (Пекин, Санкт-Петербург), а также акты внедрения программных средств визуализации и обработки данных.

#### **Степень обоснованности и достоверности научных положений диссертации**

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации результатов обеспечиваются рядом факторов.

Во-первых, использован значительный объём исходных данных. Применялись данные радиолокаторов ДМРЛ-С, МРЛ-5 и WR-100, систем грозопеленгации Blitzortung, LS8000 и Maharashtra LLN. Только по штату Карнатака рассмотрено более 1200 грозовых ячеек, по 60 ячеек по каждому из сравниваемых регионов, более 2500 грозовых облаков и более 5000 связанных с ними разрядов за двухмесячный период.

Во-вторых, применены адекватные поставленным задачам методы статистического анализа: непараметрический критерий Уилкоксона для оценки значимости изменения медиан радиолокационных параметров, ранговый коэффициент Спирмена для оценки связей, линейная регрессия с расчётом коэффициента детерминации  $R^2$  и критерия Фишера, дисперсионный анализ (ANOVA) для оценки совместного влияния факторов высоты и погодных условий на отклонения модельных значений.

В-третьих, численное моделирование выполнялось с использованием апробированных физико-математических моделей. Трёхмерная нестационарная численная модель конвективного облака основана на полной системе уравнений переноса импульса, энергии, водяного пара, гидрометеоров и электрических зарядов, дополненной уравнением Пуассона для расчёта напряжённости электрического поля. Корректно представлена параметризация фазовых переходов, коагуляции, микрофизических процессов электризации. Результаты расчётов верифицированы по данным натурных, в том числе лётных, исследований.

В-четвёртых, полученные результаты не противоречат опубликованным ранее данным других авторов и в ряде случаев существенно их расширяют, что подтверждается обширным обсуждением в тексте работы с привлечением 141 литературного источника, среди которых

значительная доля современных работ зарубежных авторов (Journal of Geophysical Research, Atmospheric Chemistry and Physics, Remote Sensing, Q.J.R. Meteorological Society и др.).

В-пятых, основные результаты диссертационного исследования прошли широкую апробацию: опубликованы 20 научных работ в рецензируемых журналах, из них 13 — в журналах из перечня ВАК, 19 — в журналах, индексируемых в РИНЦ, 17 — в журналах, индексируемых в RSCI, и 12 — в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Результаты докладывались на российских и международных конференциях. Это, наряду с положительным опытом внедрения разработанных программ (акты внедрения приведены в Приложении Ж), служит подтверждением обоснованности выводов.

С учётом изложенного, можно заключить, что сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы и достоверны.

#### **Научная новизна работы**

1. Впервые проведено комплексное сравнительное исследование изменений радиолокационных параметров конвективных облаков при их переходе в грозовую стадию для трёх существенно различающихся по климатическим условиям регионов — Северо-Запад РФ, Северный Кавказ и Индия. Показано, что в облаках умеренных широт при начале разрядов наблюдается значимое увеличение ряда параметров (высота верхней границы, максимальная отражаемость, объёмы переохлаждённой части облака с высокой отражаемостью), тогда как в облаках тропических широт характер изменений принципиально иной — для большинства значимых случаев характерно уменьшение значений параметров.

2. Получены новые количественные характеристики грозовых облаков муссонного и постмуссонного периодов в Индии. Показано, что муссонные грозовые облака существенно отличаются от постмуссонных по большинству радиолокационных параметров, что согласуется с предположением о различных доминирующих механизмах электризации в этих сезонах: в активную фазу муссона электризация облаков связана преимущественно с мелкими ледяными частицами и интенсивными восходящими потоками, а не с крупными ледяными частицами, как это характерно для облаков умеренных широт.

3. Впервые выполнено обобщение серии расчётов с использованием трёхмерной нестационарной численной модели конвективного облака и получены статистические характеристики облаков в момент перехода в грозовую стадию.

4. Получены новые сведения о пространственной структуре зарядов и напряжённости электрического поля в облаке и вне его на различных стадиях его развития. Показано, что высота формирования разряда увеличивается на этапе развития облака и стабилизируется вблизи уровня изотермы  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  при переходе облака в стадию зрелости.

5. Представлены количественные оценки физического эффекта активных воздействий льдообразующим реагентом по результатам численного моделирования, в том числе установлен факт ускорения перехода облака в грозовую стадию и возможности формирования инвертированной зарядовой структуры.

6. Предложены и апробированы две методики ансамблевого прогноза параметров грозовых облаков на базе модели конвективного облака малой размерности, отличающиеся способом внесения возмущений в начальные данные.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы определяется тем, что полученные результаты расширяют существующие представления о пространственной и временной структуре электрических, микрофизических и динамических полей в грозовых облаках различных климатических зон, о связи параметров облака с появлением молний и об эффективности существующих радиолокационных предикторов грозовой активности. Выявленные особенности грозовых облаков муссонного и постмуссонного периодов в Индии могут служить основой для построения новых физико-статистических моделей электризации, учитывающих региональные различия механизмов формирования разрядов.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

— полученные новые данные о характеристиках грозовых облаков в различных регионах могут использоваться при совершенствовании методов прогноза грозовой активности и связанных с ней опасных явлений (наукастинг), а также при разработке методик активных воздействий на конвективные облака;

— разработанные методики ансамблевого прогноза с использованием модели малой размерности могут быть использованы для оперативного прогноза параметров грозовых облаков в условиях неопределённости начальных данных;

— разработанные программные средства (программы визуализации результатов трёхмерных расчётов, «Extremum visualizer», «RawinCompile») внедрены в практику научных исследований, что подтверждено актами внедрения (Приложение Ж);

— результаты, полученные по облакам в Индии, представляют непосредственный практический интерес для совершенствования региональных методик прогноза опасных конвективных явлений в тропических широтах.

#### **Оценка положений, выносимых на защиту**

На защиту выносятся четыре положения, охватывающие основные результаты диссертационной работы:

— результаты экспериментальных исследований радиолокационных и электрических характеристик облаков при переходе в грозовую стадию для регионов с различными климатическими условиями;

— характеристики муссонных и постмуссонных грозовых облаков в Индии;

— статистические характеристики облаков при переходе в грозовую стадию по результатам трёхмерного численного моделирования;

— оценка физического эффекта активных воздействий на облако по результатам численного моделирования.

Все положения, выносимые на защиту, конкретны, и подтверждены опубликованными работами автора. Положения являются новыми и не воспроизводят результаты, полученные ранее другими исследователями.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников из 141 наименования и семи приложений. Общий объём работы составляет 155 страниц, текст иллюстрирован 36 рисунками и 20 таблицами. Структура работы логична и соответствует поставленным задачам: от анализа современного состояния исследований в первой главе автор последовательно переходит к результатам обработки экспериментальных данных (глава 2) и к результатам численного моделирования различной степени сложности (глава 3).

#### **Оценка автореферата и публикаций**

Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание работы, корректно воспроизводит структуру диссертации, её основные положения и выводы. Полнота изложения материала, объём и количество иллюстраций соответствуют требованиям, предъявляемым к авторефератам кандидатских диссертаций.

Опубликованные по теме диссертации работы (20 публикаций в рецензируемых научных изданиях, в том числе 13 в журналах из перечня ВАК, 19 в журналах РИНЦ, 17 в журналах RSCI и 12 в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus) достаточно полно отражают полученные результаты. Перечень публикаций демонстрирует, что соискатель является активно работающим исследователем.

#### **Замечания по диссертации**

При общей положительной оценке работы в ней имеется ряд дискуссионных моментов и недочётов, которые необходимо отметить.

1. Используемые в работе радиолокаторы (ДМРЛ-С, МРЛ-5, WR-100) существенно различаются по техническим характеристикам — длине волны (5,3; 10 и 5,4 см соответственно), методике вторичной обработки данных (программы «ГИМЕТ-2010» и TITAN). Аналогично различаются и системы регистрации разрядов (Blitzortung, LS8000, MLLN), обладающие разной чувствительностью и точностью локализации. В тексте диссертации недостаточно подробно обсуждается возможное влияние этих различий на результаты межрегионального сравнения характеристик облаков.

2. Имеются отдельные неоднозначности в описании измерительной и временной базы. В частности, период обзора радиолокатора WR-100 (штат Карнатака) в таблице 2.1 указан равным 3,5 мин, тогда как в тексте раздела 2.1 — 7,5 мин; при этом частота разрядов рассчитывалась исходя из интервала 3,5 мин. Кроме того, шаг сетки заблаговременности при анализе перехода в грозовую стадию (3 и 11 мин) не вполне согласуется с заявленными периодами обзора различных радиолокаторов. Кроме того, в работе не приведены сведения о разрешающей способности метеолокаторов (горизонтальной и вертикальной), их углах сканирования и наборе углов места —

в Таблице 2.1 этих сведений нет. В разделе 2.1 (с. 32) указано лишь, что использовались осреднённые по пространству данные с разрешением 1 км, что обеспечивает формальную сопоставимость, однако не устраняет различий в физическом разрешении луча на рабочих дистанциях 30–120 км, обусловленных шириной диаграммы направленности и длительностью импульса каждого из приборов.

3. Используемое в тексте работы выражение «электрические характеристики облаков» применительно к величинам, получаемым системами регистрации грозových разрядов (частота разрядов, тип разряда, сила тока), является не вполне строгим. Указанные характеристики относятся непосредственно к электрическим разрядам, связанным с облаком, а не к свойствам самого облака как такового.

4. В тексте автореферата (положения, выносимые на защиту, п. 3) и в соответствующих местах диссертации для микрофизических фракций модели используется термин «крупные ледяные частицы» (ледность 0,9 и 4,0 г/м<sup>3</sup>), тогда как в других местах работы для аналогичных результатов применяются термины «градины», «крупа» и «кристаллические осадки». Подобные терминологические разночтения встречаются неоднократно и затрудняют восприятие материала и сопоставление результатов.

5. В тексте работы встречаются отдельные опечатки, неточности оформления и стилистические шероховатости. В частности, в нумерации разделов главы 3 присутствуют два раздела с одинаковым номером «3.5» (раздел о результатах ансамблевого прогноза и раздел «Выводы к главе 3»); встречаются и иные погрешности (например, «увеличивается частота электрических зарядов» вместо «разрядов»). Это, однако, не препятствует пониманию содержания работы.

Указанные замечания носят дискуссионный характер, не затрагивают существа полученных в работе научных результатов и не снижают общей высокой оценки диссертационного исследования.

#### **Соответствие диссертации специальности и требованиям ВАК**

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научная задача, имеющая существенное значение для физики облаков и атмосферного электричества. Работа выполнена на высоком методическом уровне, отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям.

Диссертационная работа Тороповой Марины Леонидовны «Исследование грозových облаков по данным дистанционных измерений и численного моделирования» соответствует критериям пп. 9–11, 13, 14 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О присуждении учёных степеней». Соискатель Торопова Марина Леонидовна заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Отзыв подготовил:

Коровин Евгений Александрович  
к.т.н., 20.01.10, старший преподаватель  
кафедры технологий и средств  
геофизического обеспечения  
Федерального государственного бюджетного  
военного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Военно-космическая академия  
имени А.Ф.Можайского»  
(191198, г.Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13  
Тел.: (812) 347-95-52. E-mail: evgen\_korovin@mail.ru

« 8 » 06 2026 г.

### Согласие на обработку персональных данных

Я, Коровин Евгений Александрович, согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты кандидатской диссертации Тороповой Марины Леонидовны, в том числе на размещение их в сети Интернет.

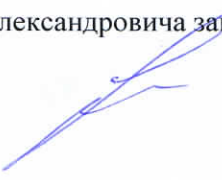
«8» 06 2026 г.



Коровин Е.А.

Подпись Коровина Евгения Александровича заверяю:

Начальник отдела кадров



Плотников Г.В.