

## 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**

Грозы – уникальное природное явление, представляющее значительную опасность не только для жизни и здоровья человека, но и для его хозяйственной деятельности. По уровню социального и совокупного экономического ущерба грозовая активность является вторым по силе стихийным бедствием после наводнений. Широкое использование слаботочной микроэлектроники и тенденция к цифровизации приводят к неуклонному росту опасности грозового воздействия. Ущерб, причиняемый грозовыми явлениями, трудно переоценить, и, скорее всего, он будет нарастать в будущем из-за увеличения частоты и интенсивности гроз в отдельных регионах и на планете в целом в силу глобального потепления и аэрозольного загрязнения атмосферы. При этом, несмотря на впечатляющий прогресс современных методов наблюдения грозовых облаков и значительные теоретические усилия в их исследовании, физические механизмы развития различных их типов до сих пор остаются за пределами горизонта понимания и в условиях изменения климата формируют нелицеприятный вызов научному сообществу. Так, весьма немногочисленны детальные сравнительные исследования региональных различий характеристик грозовых облаков и облаков, переходящих в грозовую стадию, а в работах с применением численных моделей редко воспроизводится весь комплекс термодинамических, микрофизических и электрических характеристик облаков. Исследования, результаты которых представлены в настоящей диссертации, направлены на преодоление указанных пробелов и являются весьма актуальными.

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

Первая глава традиционно посвящена обзору литературы. Приведены основные понятия и представлены современные подходы к использованию оценок конвективной неустойчивости атмосферы и условий формирования грозовых облаков. Выполнен обзор исследований электрической структуры грозовых облаков, в котором отмечается ведущая роль численных моделей, обладающих рядом преимуществ по сравнению с данными наблюдений. Обзор очень хорошо актуализирует основные направления диссертационной работы: детальные сравнительные исследования региональных различий характеристик грозовых облаков и облаков, переходящих в грозовую стадию, и реализация численных моделей, воспроизводящих весь комплекс термодинамических, микрофизических и электрических характеристик облаков.

В главе 2 диссертационной работы был выполнен сравнительный анализ изменения параметров облаков развивающихся в атмосфере умеренных и тропических широт при переходе в грозовую стадию по данным радиолокационного зондирования и систем мониторинга грозовой активности на примере трёх регионов – северо-запада РФ (Санкт-Петербург), Северного Кавказа (Ставрополь) и Индии (Гадаг). Проанализированы статистические характеристики грозовых облаков, выполнена оценка статистической значимости изменений радиолокационных параметров облаков на до грозовой стадии и при начале электрических разрядов. Исследованы особенности грозовых облаков муссонного и пост муссонного периода. Приведены результаты регрессионного анализа связей частоты молний и радиолокационных характеристик. При этом нельзя не отметить грандиозный объём данных, обработанных диссертантом. Мощность выборки для каждого региона составила примерно 60 ячеек, переходящих в грозовую стадию. В рамках проведённого исследования выявлено, что в облаках Северо-Запада РФ и Северного Кавказа радиолокационные параметры облаков при переходе в грозовую стадию значимо превышают значения, наблюдавшиеся до появления первого разряда. При этом различия медиан указанных параметров на Северном Кавказе больше, чем на Северо-Западе, как и частота разрядов, что в целом указывает на более интенсивные процессы облакообразования и электризации в этом регионе. Показано, что, хотя облака в Индии и достигают значительных высот, при этом имеют небольшие значения максимальной радиолокационной отражаемости и переохлажденных объемов с высокими значениями отражаемости. При этом установлено, что

значения параметров при начале разрядов меняются мало. Был выполнен регрессионный анализ облаков, построены модели линейной регрессии, связывающие частоту разрядов и различные радиолокационные параметры. Выявлено наличие достаточно сильных связей между частотой разрядов и радиолокационными параметрами облаков. При этом автором установлено, что в большинстве случаев эти связи не могут быть аппроксимированы линейными моделями регрессии, поскольку носят сложный нелинейный характер.

В главе 3 приведены результаты анализа развития грозных облаков с использованием численных моделей. С помощью трехмерной нестационарной модели конвективного облака, разработанной рядом научных институтов Росгидромета под руководством ФГБУ «ГГО» подробно исследовано формирование и эволюция микрофизической и электрической структуры облаков, распределение областей восходящих и нисходящих потоков, изменение характеристик облаков при учете гетерогенного замерзания капель, сильном аэрозольном загрязнении атмосферы, активных воздействиях на облака. Система уравнений используемой в работе модели описывает перенос импульса, энергии, влажного воздуха, капель, ледяных частиц и электрических зарядов (как упорядоченный перенос, так и турбулентность); фазовые переходы, коагуляцию частиц и микрофизические процессы электризации. Фазовые переходы задаются параметрическими выражениями. Напряженность электрического поля рассчитывается при помощи уравнения Пуассона, на основании данных об объемной плотности заряда.

В разделе 3.2 диссертации приведены результаты 30 расчетов, выполненных при помощи трехмерной численной нестационарной модели конвективного облака для 9 дней с грозой. На отдельных примерах выяснено влияние на параметры развивающегося кучево-дождевого облака как строения атмосферы, так и процессов гетерогенного замерзания капель, аэрозольного загрязнения атмосферы и активного воздействия льдообразующим реагентом. В рамках проведенного исследования активное воздействие (льдообразующим реагентом) в используемой трехмерной модели воспроизводится путем замораживания доли облачных и дождевых капель в заданном слое. Было выполнено два сравнительных модельных расчета: естественно развивающееся облако и облако подверженное активному воздействию. Результаты расчетов показали увеличение ледности облачных кристаллов сразу после начала активного воздействия на фоне уменьшения содержания всех остальных фракций. Формирование инвертированной структуры заряда при моделировании активного воздействия объясняется повышенным содержанием облачных ледяных кристаллов, выносимых восходящими потоками в вершину облака. Также в случае воздействий отмечается ускорение перехода облака в грозовую стадию, когда его основные характеристики (высота верхней границы, мощность, скорости восходящего потока и проч.) имеют меньшие значения, чем при естественном развитии. При этом области расположения основной массы частиц осадков (дождевых капель и градин) меняются мало, в то время как вершина облака занята преимущественно облачными кристаллами, а область наибольшего содержания облачных капель смещается ниже. Также при воздействиях увеличивается максимальная частота электрических зарядов.

В работе впервые представлено обобщение расчетов, выполненных при помощи трехмерной численной модели облачной конвекции: проанализированы характеристики облаков при начале электрических разрядов. Анализ выполнен для 10 расчетов, где воспроизводились облака различных регионов (Северо-Кавказского и Северо-Западного региона РФ, Китая) и варьировался учет физических процессов (гетерогенного замерзания и коронных разрядов). Кроме того, в главе 3 приведены результаты апробации двух разработанных методик ансамблевого прогноза характеристик грозных облаков с использованием модели конвективного облака малой размерности (ФГБУ «ГГО»). Использовались две версии модели: полная (с электрическими процессами) и физико-статистическая (без электризации, с эмпирическими критериями опасных явлений). Вносились возмущения в данные аэрологического зондирования (серия из 30 расчетов) и выполнялся контрольный. Возмущения вносились в значения температуры и влажности: только в приземные значения (первая методика), на всех вертикальных уровнях (вторая). Результаты показали, что наиболее чувствительными к вносимым возмущениям оказались микрофизические характеристики облаков и их функции (максимальная радиолокационная отражаемость). Обе методики показали хорошее соответствие данным радиолокационных измерений. 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 (полноразмерная)

модель использовалась соискателем для получения характеристик конвективных облаков в рамках ансамблевого прогноза грозы. Также модель эффективно применялась для оценки влияния на прогноз грозовых облаков отклонений в стратификации атмосферы, полученной с помощью мезомасштабной модели WRF, по сравнению с данными аэрологических наблюдений.

В заключении приведены основные результаты работы и сделаны выводы, которые выглядят вполне убедительными и вытекают из результатов проведенных в диссертации исследований. Вместе с тем диссертационная работа не свободна от ряда недочётов. Ниже замечания и вопросы распределены по главам диссертационной работы.

#### **Замечания по первой главе.**

Некоторые сокращения не определены в тексте диссертации, например – ОЯ (опасные явления) стр. 16. Там же на стр. 16 введено сокращение ОКЯ, больше оно нигде не появляется. Это же относится и к автореферату диссертации.

#### **Замечания по второй главе.**

При сравнении результатов исследований с данными литературы мировая практика в предметной области диссертационной работы освещена слабо. Так, в работе большое внимание уделено грозам в Индии в периоды муссонов, постмуссонов и т.д. Между тем, в Индии есть группа под руководством Сумайжэти Яна (бывший аспирант Рохита Чакраборти, <https://www.researchgate.net/profile/Soumyajyoti-Jana>) в Индийском институте тропической метеорологии в Пуне. Группа проводит исследования атмосферных возмущений, связанных с конвективными процессами с использованием радиотехнических и оптических методов в тропическом регионе. Например, в одной из недавних работ группы «Прогнозирование молнии с помощью измерений электрического поля, связанных с конвективными событиями в тропическом регионе» (<https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-023-03229-7>) была предложена модель для прогнозирования ударов молнии во время муссонных и предмуссонных периодов и с помощью измерений электрического поля осуществлён краткосрочный прогноз молний во время конвективных явлений в тропическом городе Калькутта (столица штата Западная Бенгалия) в дельте Ганга на востоке Индии. К сожалению, в диссертационной работе отсутствуют ссылки на работы данной группы.

Далее, в главе 2 есть раздел 2.6. про корреляцию молний и объемов облака с заданными параметрами отражаемости. Подобные работы есть как у российских коллег (например, Дементьева С. О., Ильин Н. В., Шаталина М. В., Мареев Е. А. Прогноз конвективных явлений и его верификация по данным наблюдений атмосферного электричества // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2020, Т. 56, № 2, стр. 150-157), так и зарубежных коллег (например, Liu, C., D. J. Cecil, E. J. Zipser, K. Kronfeld, and R. Robertson (2012), Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics, J. Geophys. Res., 117, D06212, doi:10.1029/2011JD017123 и Liu D., Yu H., Sun C. Estimation of lightning activity of squall lines by different lightning parameterization schemes in the Weather Research and Forecasting Model // Remote Sens. 2023. V. 15. P. 5070. DOI: 10.3390/rs15205070).

#### **Вопросы и замечания по третьей главе.**

Полуторамерная модель, **раздел 3.1.1.** Это модель осесимметричного цилиндрического облака. В диссертации приведено только краткое (даже слишком) описание используемой модели. Приведено разрешение по вертикали (200 м), но не приведены пространственные масштабы всего облака - радиус цилиндра и высота верхней части облака. Начальными данными являются чаще всего данные радиозондирования, откуда следует логичный недостаток в точности - зонд не позиционируется в пространстве, поэтому под действием горизонтальных ветровых нагрузок может уходить в сторону и измерять не вертикальный профиль, а вертикальный профиль со смещением. На сколько отклонение от вертикали может быть существенным при использовании полуторамерной модели для оценки влияния на прогноз грозовых облаков отклонений в стратификации атмосферы, полученной с помощью мезомасштабной модели WRF (Weather Research and Forecasting), по сравнению с данными аэрологических наблюдений. Каким образом на зонде фиксируются отсечки по высоте и могут ли здесь возникнуть проблемы с неравномерностью данных?

Трёхмерная модель, **раздел 3.1.2.** Представленная в диссертационной работе модель описана, однако не достаточно подробно, отсутствуют важные подробности. Здесь тоже хотелось бы видеть чёткие данные про пространственное разрешение и размер моделируемой области. В диссертационной работе указано, что 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. Хотелось бы понять как при этом реализуется широкое распределение перечисленных параметров в графическом представлении результатов моделирования.

В разделе 3.2.1 речь идёт про электрическую структуру на разных этапах развития облака. Если по осям на рис. 3.3 указаны километры, то получается, что на развитой стадии грозное облако имеет высоту всего 6-8 км. Это специфика Северного Кавказа? Здесь однозначно нужен комментарий.

В разделе 3.2.2 представлены результаты исследования влияния аэрозольного загрязнения на характеристики облаков на примере Пекина. Здесь важно отметить, что китайские коллеги еще в 2015 году провели подобное исследование с помощью модели WRF на идеализированной континентальной грозе (case study) и еще дополнительно показали, что зарядовая структура становится инвертированной (Pengguo Zhao, Yan Yin, Hui Xiao. The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification: A numerical study // Atmospheric Research 153 (2015) 376–391 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.09.011>). Однако в диссертации отсутствуют как ссылки на данную работу, так и сравнения с какими-либо другими источниками.

В разделе 3.2.5 представлены результаты исследования воздействия противоголового реагента. Как результаты этого пункта, так и результаты пункта 3.2.3 неплохо было бы сравнить с данными следующей работы: Стасенко В. Н., Шаповалов В. А., Гузоев Т. Х., Гучаева З. Х., Машуков И. Х. Анализ вариаций грозовой активности и градового процесса (19 августа 2015 года. Северный Кавказ) // Метеорология и гидрология 2024 № 6. В этой работе также рассматриваются грозоградные облака на Северном Кавказе, активное воздействие и характеристики молний. Там есть косвенные свидетельства инвертированной зарядовой структуры и есть данные по активным воздействиям. Вывод автора диссертационной работы о том, что при воздействиях увеличивается частота электрических зарядов в указанной работе не подтверждается. Может ли быть это связано с другой тактикой применения активного воздействия?

Раздел 3.3 содержит анализ результатов моделирования представленной 3D моделью 10 гроз в разных регионах (Питер, Кавказ, Китай). Отсутствует сравнение результатов с другими литературными источниками, в частности с указанными в замечаниях по второй главе. Автор отмечает, что при написании настоящего раздела использовались материалы статьи, опубликованной соискателем [Торопова, 2021]. Однако этой статьи нет в списке литературы, хотя её и можно найти в списке работ автора на стр. 10 диссертации. Далее, данные, которые получены для этих 10 гроз усредняются и подаются соискателем как третье положение, выносимое на защиту (см. автореферат, стр. 6). С прицелом на будущую докторскую диссертацию соискателя, я бы не рекомендовал усреднение 10 конкретных гроз называть статистическими характеристиками облаков. Мы накидаем туда 20 облаков из Флориды и все эти медианы съедут.

Разделы 3.4.1. и 3.4.3. Почему выбраны именно эти, а не другие параметризации микрофизики? Был ли какой-то контроль базовой точности моделирования, например, по радиолокационной отражаемости? Далее в разделе 3.4.3 автор пишет «В модельной атмосфере оказывается завышен уровень конденсации и занижены те параметры неустойчивости, которые рассчитываются с использованием приземных значений метеорологических параметров». Вот это как раз очень сильно зависит от параметризации микрофизики. Далее на стр. 104 читаем: «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». Данное утверждение автора вызывает большие сомнения. Если модель в принципе показала грозу, то CAPE вряд ли может быть нулём. Скорее можно поверить в то, что по какой-то причине (нет в параметризации, отключен вывод, т.п.) мог быть не посчитан какой-то параметр, входящий в CAPE, и из-за этого на выходе получен 0.

Несмотря на указанные выше замечания и возникшие вопросы диссертационная работа производит очень приятное впечатление, автореферат хорошо оформлен, соответствует тексту диссертации и даёт полное представление о проведённых исследованиях и полученных в диссертационной работе результатах. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, выводы вполне обоснованы и вытекают из результатов проведенных исследований.

Диссертационная работа Тороповой Марины Леонидовны «Исследование грозовых облаков по данным дистанционных измерений и численного моделирования» соответствует требованиям пп.9-14

Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней». Соискатель Торопова Марина Леонидовна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.6.18 Науки об атмосфере и климате.

Отзыв подготовил:

Иудин Дмитрий Игоревич доктор физико-математических наук (шифр специальности: 010801 Радиофизика и электроника); доцент по специальности, заведующий кафедрой медицинской биофизики Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава РФ),

Адрес организации: 603950, г. Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д.10/1

Телефон, адрес электронной почты сотрудника: +7 902 304 3709, iudin@ipfran.ru

« 07 » июня 2026 г.

### Согласие на обработку персональных данных

Я, **Иудин Дмитрий Игоревич**, 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.

« 07 » июня 2026 г.

/ Иудин Дмитрий Игоревич

Подпись **Иудина Дмитрия Игоревича** заверяю:



Учёный секретарь  
ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России  
Кандидат биологических наук, доцент

Юлия Андреевна Сорокина

« 08 » июня 2026 г.