

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио директора ФГБУ «Высокогорный  
геофизический институт»,  
М.Ю. Беккиев



2026 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации о научно-практической ценности диссертации Тороповой Марины Леонидовны на тему «Исследование грозовых облаков по данным дистанционных измерений и численного моделирования» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

### 1. Актуальность избранной темы.

Требования к средствам мониторинга грозовой активности, обеспечивающих решение задач, связанных с своевременным обнаружением и предотвращением возможных последствий негативного воздействия грозовой активности на различные объекты человеческой деятельности, постоянно ужесточаются. 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).

В настоящее время в России ряд научных институтов, в т.ч. входящих в структуру Росгидромета, продолжают 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.

Особую актуальность указанные исследования имеют в свете изменения климата, одним из проявлений которого является изменение частоты и интенсивности в различных регионах отдельности и географического распределения гроз на Земле в целом.

**2. Научная новизна проведенных исследований заключается в следующем:**

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

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

Впервые выполнено обобщение серии расчетов с использованием трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака. Получены значения характеристик облаков при переходе в грозовую стадию.

**3. Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов.**

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.

**4. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Считаем целесообразным продолжить работу в направлении исследования грозовых облаков по данным дистанционных измерений и численного моделирования характеристик грозовой активности.

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 в указанных регионах. 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 конвективной 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  $-22^{\circ}\text{C}$  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 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 выполнения 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/м<sup>3</sup>), ледность облачных ледяных кристаллов и градин (0,9 и 4,0 г/м<sup>3</sup>). 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.

## 5. **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.**

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

**6. Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом**

Оценивая работу, в целом, можно заключить следующее. Результаты исследований Тороповой М.Л. следует рассматривать как вклад в развитие физики облаков, поскольку они углубляют фундаментальные представления об электризации кучево-дождевых облаков. С практической стороны работа показывает необходимость расширения и уточнения перечня радиолокационных критериев грозоопасности с учетом действующих механизмов электризации облаков и выполняемых активных воздействий.

**7. Замечания по работе**

- На рисунках радиолокационных сечений грозового облака в Индии (Приложение Б, стр. 136) не приведена шкала значений радиолокационной отражаемости.

- По всей работе используются различные обозначения одних и тех же величин – так, для высоты верхней границы облака (высоты радиоэха) имеется 4 таких обозначения.

- При анализе распределений доли разрядов «облако-земля» и «облако-облако» в Индии приводятся данные, объединенные для обоих сезонов – муссонного и постмуссонного (стр. 44). Остается неясным, есть ли различия для облаков различных сезонов.

- При анализе зависимости частоты разрядов от радиолокационных параметров приводятся данные о связях с радиолокационным параметром  $dV35$ - объем переохлажденного облака с отражаемостью более 35 dBZ (временные ряды развития параметров облаков разных регионов). Нет пояснений, чем обоснован такой выбор параметра.

- При выполнении регрессионного анализа построены модели одномерной линейной регрессии и сделан вывод, что такие модели в большинстве случаев не могут описать исследуемые связи. Было бы полезно построить нелинейные модели и рассмотреть вариант множественной регрессии.

- Рис. 3.9 на стр. 96 (нормированные величины параметров облаков при начале разрядов) сложный и трудночитаемый. Так, анализ влияния температурно-влажностного строения атмосферы, сгруппированный в тексте по учитываемым физическим процессам (рассматриваются две группы) по рисунку выполнить крайне сложно. Было бы полезно представить несколько графиков для различных аспектов анализа.

**8. Соответствие автореферата основным положениям диссертации.**

Автореферат соответствует основным положениям диссертации.

**9. Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.**

Публикации, приведенные в автореферате и диссертации опубликованы в научной печати (подтверждаются сайтом [elibrary.ru](http://elibrary.ru)).

**10. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Таким образом, диссертация Тороповой М.Л. является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором А.Х. Аджиевым.

Отзыв обсужден и одобрен на семинаре отдела стихийных явлений Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт» 5 июня 2026 г.

Протокол № 12.

**Сведения о ведущей организации:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт» (ФГБУ «ВГИ»).

Адрес: 360001, Россия, КБР, г.Нальчик, пр.Ленина, 2

Тел.: (8662) 40-19-16

E-mail: [adessa1@yandex.ru](mailto:adessa1@yandex.ru)

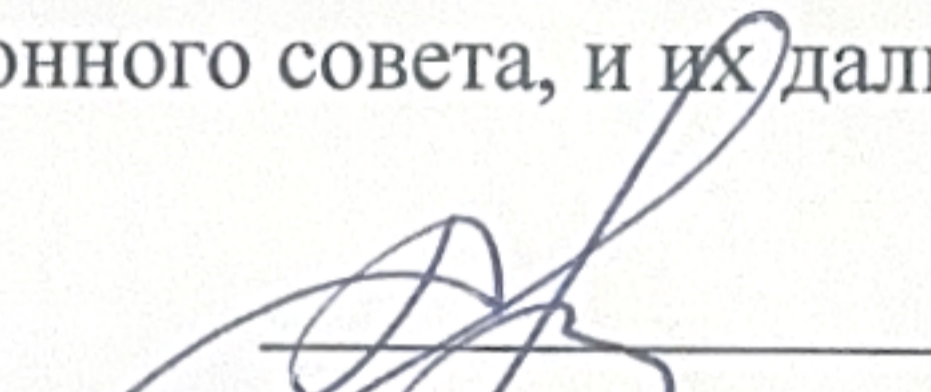
Сайт: <http://vgistikhiya.ru>

Доктор физико-математических наук, профессор  
Заведующий отделом стихийных явлений  
ФГБУ "Высокогорный геофизический институт"



Аджиев Анатолий Хабасович

Я, Аджиев Анатолий Хабасович даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

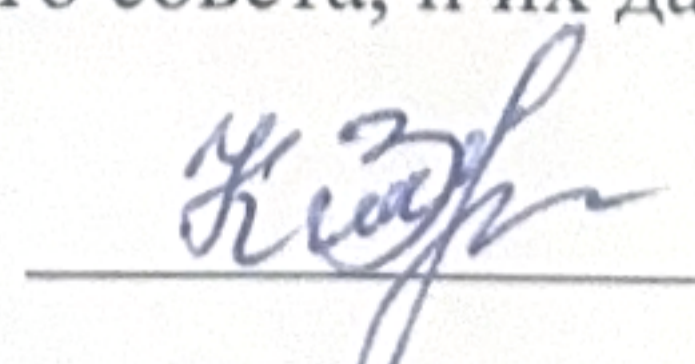
  
Аджиев Анатолий Хабасович  
ПОДПИСЬ зав. отдела с.я ФГБУ «ВГИ»  
п.р.-и.н., проф. Аджиева А.Х.  
**ЗАВЕРЯЮ. УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ФГБУ «ВГИ»**  
п.р.-и.н. Мухоморова И.В.  
« 05 » 06 20 26 г.

Кандидат физико-математических наук  
Старший научный сотрудник отдела стихийных явлений  
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»

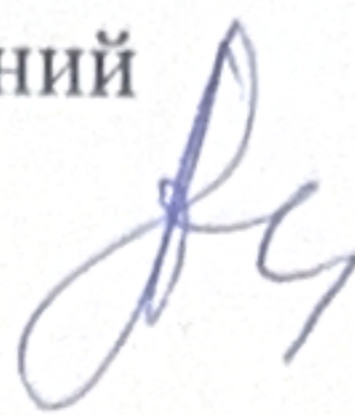


Керефова Залина Музариновна

Я, Керефова Залина Музариновна даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

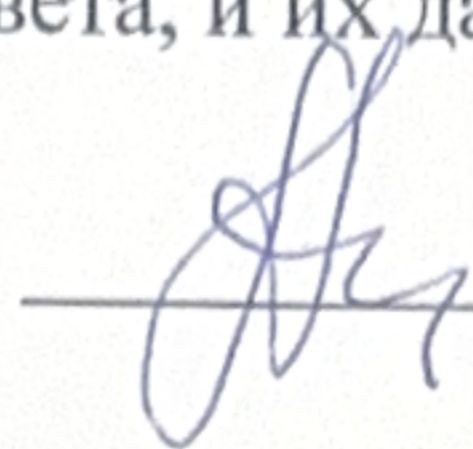
  
Керефова Залина Музариновна  
ПОДПИСЬ с.н.с. отдела с.я ФГБУ «ВГИ»  
п.р.-и.н. Керефовой З.М.  
**ЗАВЕРЯЮ. УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ФГБУ «ВГИ»**  
п.р.-и.н. Мухоморова И.В.  
« 05 » 06 20 26 г.

Кандидат физико-математических наук  
Старший научный сотрудник отдела стихийных явлений  
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»



Агзагова Мадина Борисовна

Я, Агзагова Мадина Борисовна даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Агзагова Мадина Борисовна

**ПОДПИСЬ** СНЧ отдела СЯ ФГБУ ВНИИ  
К.ф.-м.н. Агзаговой М.Б.

**ЗАВЕРЯЮ. УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ФГБУ «ВГИ»**  
К.ф.-м.н. Мать (Тарасова М.В.)

« 05 » 06 20 20 21