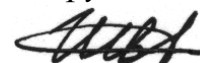


*На правах рукописи*



**Шаповалов Виталий Александрович**

**Закономерности формирования макро- и  
микроструктурных характеристик грозоградовых облаков с  
учетом взаимодействия термогидродинамических,  
микрофизических и электрических процессов**

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология,  
агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в лаборатории математического моделирования  
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» Федеральной службы по  
гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет)

- Научный консультант: **Ашабоков Борис Азреталиевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий отделом физики облаков, ФГБУ  
«Высокогорный геофизический институт» (ФГБУ  
«ВГИ»), г.Нальчик
- Официальные  
оппоненты: **Дрофа Александр Семенович**,  
доктор физико-математических наук, старший  
научный сотрудник, ФГБУ «НПО «Тайфун» (ФГБУ  
«НПО «Тайфун»), г.Обнинск
- Морозов Владимир Николаевич**,  
доктор физико-математических наук, главный  
научный сотрудник, ФГБУ «Главная геофизическая  
обсерватория им. А.И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»),  
г.Санкт-Петербург
- Рубинштейн Константин Григорьевич**,  
доктор физико-математических наук, старший  
научный сотрудник, ФГБУ «Гидрометеорологи-  
ческий научно-исследовательский центр Российской  
Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»),  
г.Москва
- Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный  
университет» (ФГАОУ ВО «СКФУ»), г.Ставрополь

Защита состоится «    »    2020 года в    часов на заседании  
Диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном  
гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-  
Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82,372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
Российского государственного гидрометеорологического университета.

**Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу 192007,  
Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, дом 79, Российский  
государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный  
совет Д.212.197.01, Ученому секретарю.**

Автореферат разослан «    »    2019 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, к.ф.-м.н., доцент



Л. В. Кашлева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Состояние физики конвективных облаков в настоящее время характеризуется следующим: получен большой объем экспериментальных данных по исследованию облаков и облачных процессов, разработан математический аппарат, позволяющий описывать различные термодинамические и микрофизические процессы, разработаны математические модели облаков различной сложности, разработаны высокотехнологичные инструментальные средства дистанционного зондирования облаков, созданы метеорологические радиолокационные и грозопеленгационные сети во многих странах. Существенный вклад в развитие физики облаков и активных воздействий на них в Российской Федерации внесли коллективы институтов Росгидромета: «ГГО им. А.И.Воейкова», «ЦАО», «ВГИ», «НПО «Тайфун», «ИПГ», «НИЦ «Планета», других организаций РАН и Министерства образования и науки.

Отметим, что наряду с успехами, достигнутыми в физике облаков за последние десятилетия, многие вопросы еще остаются малоизученными. Это относится к процессам в облаках с участием ледяных частиц, электричеству облаков, взаимодействию физических процессов в облаках и др.

В физике облаков по объективным причинам менее всего изучены электрические процессы, хотя этому направлению уделяется большое внимание. Лабораторные исследования показывают, что большинство микрофизических процессов происходят по-другому при наличии электрических полей. Электрические поля и заряды на частицах влияют на конденсацию водяного пара, коэффициенты захвата облачных частиц, вероятность разрушения капель, вероятность их замерзания и т.д. В облаках электрические силы влияют на формирование микроструктурных характеристик, образование осадков, взаимодействие реагента с облачной средой при активных воздействиях.

Несмотря на выполненный в разных странах широкий круг исследований по проблеме искусственного увеличения осадков, эффект засева облаков реагентами до сих пор остается недостаточно подтвержденным и трудно поддается количественной оценке. Такое положение дел объясняется тем, что степень изученности атмосферных процессов не отвечает еще в полной мере требованиям практики.

Математическое моделирование играет в физике облаков важнейшую роль. Численные модели успешно развиваются в нашей стране (Е.Л.Коган, И.П.Мазин, Б.А.Ашабоков, Б.Н.Сергеев, Р.С.Пастушков, Ю.А.Довгалюк, Н.Е.Веремей и др.) и за рубежом (R.D.Farley, H.D.Orville, W.R.Cotton, A.P.Khain, A.I.Flossmann, J.A.Curry, E.R.Mansell, T.Reisin, H.Morrison, J.Fan, T.Iguchi, R.Onishi и др.), в том числе, модели с учетом электрических процессов. В настоящее время разработаны трехмерные модели конвективных облаков, как с параметризованной (bulk) микрофизикой, так и с явной (bin) микрофизикой. Более сложной является реализация моделей с явной (спектральной) микрофизикой. Но, в тоже время, второй подход является более реалистичным, т.к., применяемые уравнения описывают

физику облачных процессов, и учитывают физические свойства множества (несколько десятков) классов облачных частиц. Недостатком ряда авторов является игнорирование учета в моделях электрических процессов.

Результаты численного моделирования способствовали установлению основных закономерностей образования и развития конвективных облаков и основных процессов, приводящих к формированию и росту частиц осадков. Предложены также различные концепции воздействия с целью искусственного увеличения осадков и на градовые облака.

Но, несмотря на успехи, достигнутые в этом направлении, можно сказать, что численное моделирование облаков находится в начале своего развития. Это связано с серьезными трудностями, встречающимися на пути разработки и широкого использования моделей. Основными из них являются: неполная ясность физических основ многих процессов в облаках и связанная с ней невозможность количественного их описания, а также сложность реализации моделей на ЭВМ.

С точки зрения решения существующих проблем в физике облаков, следует отметить, что математическое моделирование позволяет исследовать многие аспекты электрических процессов в конвективных облаках, которые в силу опасности, недоступности и других причин не удалось изучить. С помощью моделирования важно исследовать взаимодействие микрофизических и электрических процессов, которое играет существенную роль в образовании осадков в мощных облаках.

Математические модели следует развивать в различных направлениях, начиная с относительно простых для исследования конкретных процессов и заканчивая сложными трехмерными нестационарными для исследования облаков в целом и моделирования активного воздействия.

Основные направления исследований по математическому моделированию в физике облаков можно сформулировать следующим образом:

- совершенствование математических моделей в направлении уточнения и расширения учитываемых в них процессов;
- использование более эффективных методов проведения расчетов;
- использование новых способов формирования входных данных;
- изучение закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков при естественном развитии и активном воздействии;
- исследование взаимодействия физических процессов в облаках и облаков с окружающей атмосферой.

Возможности использования численного моделирования как эффективного инструмента исследования облаков различных типов расширяются, что связано как с развитием физики облаков, так и с развитием вычислительной математики и вычислительной техники, а также методов параллельного программирования.

В связи с вышеизложенным, численное моделирование эволюции конвективных облаков при естественном развитии и активном воздействии с

учетом электрических процессов является актуальным направлением исследований, позволяющим решать на научной основе многие вопросы физики облаков и активных воздействий на них.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является разработка трехмерной численной модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов и исследование на ее основе формирования макро- и микроструктурных характеристик, электрических параметров, эмерджентных свойств облаков, образования осадков при естественном развитии и активном воздействии.

**Основные задачи исследования:**

- Разработка трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов.

- Верификация модели на основе сравнения с данными радиолокационных наблюдений структуры и данными экспериментальных измерений параметров облаков.

- Проведение численных экспериментов с использованием разработанной модели и анализ результатов расчетов.

- Исследование особенностей трансформации микроструктурных и электрических параметров мощных конвективных облаков при различных состояниях атмосферы.

- Моделирование активного воздействия на конвективные облака кристаллизующим реагентом с целью искусственного увеличения осадков, разработка рекомендаций по усовершенствованию технологий засева.

- Разработка программных средств комплексного анализа радиолокационной метеорологической информации и систем грозопеленгации.

- Разработка алгоритмов экстраполяции направления и скорости перемещения, и интенсивности опасных явлений погоды.

**Объектом исследования** являются конвективные облака, физические параметры в облаках и окружающей атмосфере.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются макроструктурные, микроструктурные и электрические характеристики облаков, их формирование и эволюция, взаимное влияние физических процессов друг на друга, образование осадков в облаках.

**Материалы и методы исследования.** Применяется эффективный метод исследования сложных систем – математическое моделирование.

В диссертации использован широкий набор методов численного решения дифференциальных уравнений в частных производных. Численные схемы основаны на методах покомпонентного расщепления (локально - одномерные схемы) и на принципах расщепления по физическим процессам.

При анализе данных наблюдений использовались геоинформационные технологии, методы интерполяции, экстраполяции, корреляционного

анализа. Для комплексной обработки изображений использованы методы контурного и кластерного анализа, нейронные сети.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- Разработана трехмерная численная модель конвективного облака с учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Модель отличается тем, что используется детальная микрофизика с 61-й градацией жидких и 75-ю – градациями твердых частиц. Учитываются: накопление зарядов в облаке, напряженность электрического поля, электрическая коагуляция облачных частиц. Разработана методика формирования трехмерных исходных данных при инициализации модели.

- На основе разработанной модели с детальным описанием физических процессов впервые исследовано формирование макро- и микроструктурных, и электрических параметров. Определена динамика изменения характеристик грозоградовых облаков на стадии роста и максимального развития.

- Исследованы электрические характеристики мощных конвективных облаков в различные моменты времени и их взаимосвязь с микроструктурными параметрами. Определена пространственная структура объемных электрических зарядов в облаке, трехмерное распределение напряженности электрического поля.

- Получена количественная оценка влияния электрической коагуляции на скорость образования осадков в мощных облаках.

- Исследовано влияние взаимодействия конвективных облаков с атмосферой, обусловленное структурой поля ветра в атмосфере, на формирование их макро- и микроструктурных характеристик.

- С применением разработанной модели исследовано изменение микроструктурных параметров конвективных облаков при засева реагентом.

- Исследована эффективность АВ на конвективные облака с целью искусственного увеличения осадков.

- Сформулированы предложения по оптимизации технологии засева льдообразующими реагентами.

- На основе полной трехмерной модели исследовано распространение искусственных ледяных частиц в облаке при активном воздействии.

- Разработано программно-математическое обеспечение комплексной обработки радиолокационной и грозопеленгационной информации для идентификации опасных явлений погоды, экстраполяции координат их перемещения.

- Разработано программно-математическое обеспечение трехмерной визуализации данных численного моделирования и радиолокационной информации метеорологических радиолокаторов.

**Научная и практическая ценность** полученных в диссертации результатов заключаются в следующем:

- Разработанная трехмерная численная модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов может применяться для исследований по физике облаков, расчета

параметров жидких и твердых осадков при естественном развитии и активных воздействиях.

- Полученные в численных экспериментах результаты позволяют расширить и углубить существующие теоретические представления о формировании микроструктурных характеристик конвективных облаков при различных условиях их образования и развития.

- Исследование взаимодействия различных процессов в облаках расширяет теоретические знания по физике облаков.

- Трехмерная модель с учетом электрических процессов позволяет рассчитывать распределение объемных зарядов и напряженность электрического поля в облаке и в окружающем пространстве, что важно для исследования влияния электрического поля на микрофизические процессы, и для разработки в дальнейшем научно обоснованных методов управления электрическими процессами в облаках.

- Модель конвективных облаков может быть использована для численных экспериментов с целью усовершенствования существующих и разработки новых методов регулирования осадков из конвективных облаков в различных регионах, с различными термодинамическими условиями.

- Результаты численных экспериментов на основе разработанной модели необходимы для анализа эффективности методов активного воздействия на градовые облака.

- Результаты исследований особенностей развития опасных конвективных процессов в Северо-Кавказском регионе могут применяться в экспертной системе штормового оповещения.

- Результаты разработки программного обеспечения анализа и отображения данных ДМРЛ-С могут быть использованы для усовершенствования методов контроля опасных явлений погоды.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

- Трехмерная численная модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов.

- Исследованные с помощью разработанной модели закономерности формирования макро- и микроструктурных характеристик мощных конвективных облаков при естественном развитии.

- Исследованные закономерности формирования объемного заряда, потенциала и напряженности электростатического поля грозового облака на стадиях развития и зрелости.

- Исследованная в работе взаимосвязь между микроструктурными и электрическими параметрами конвективного облака на стадии роста и максимального развития.

- Результаты количественной оценки влияния электрической коагуляции на скорость роста осадков в мощных конвективных облаках.

- Результаты численного моделирования засева конвективных облаков с целью регулирования образования осадков и предложения по усовершенствованию параметров воздействия.

- Результаты исследований трансформации микроструктурных параметров мощных конвективных облаков и осадков из них при активном воздействии кристаллизующим реагентом.

- Программные средства для приема, анализа и отображения данных метеорологических радиолокаторов, комплексного анализа радиолокационной и грозопеленгационной информации с целью идентификации опасных явлений погоды.

- Прикладное программное обеспечение трехмерной визуализации данных моделирования и радиолокационных наблюдений облаков.

**Личный вклад автора.** Автором лично разработана и реализована на ЭВМ трехмерная математическая модель конвективного облака с учетом электрических процессов. В модель включены уравнения, учитывающие электризацию облачных частиц, уравнения для определения потенциала и напряженности электростатического поля, для расчета коэффициентов электрической коагуляции. Автором разработано прикладное программное обеспечение модели с использованием алгоритмов распараллеливания, разработаны численные схемы для реализации вычислительных блоков на графических платформах.

Алгоритмы обработки и программное обеспечение трехмерной визуализации расчетных данных и радиолокационных параметров разработаны автором лично.

Автором проведены массовые численные эксперименты по исследованию образования и развития конвективных облаков при различных условиях, проанализированы расчетные данные, сформулированы выводы. Проведены расчеты активного воздействия на облака, получены количественные оценки физического эффекта активного воздействия.

Проведено сравнение полученных результатов с данными моделей других авторов и с результатами радиолокационных наблюдений и грозопеленгации.

В совместных публикациях личный вклад автора диссертации составляет от 20 до 60 процентов.

Все основные результаты и выводы получены лично автором.

**Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректностью математических методов исследования, большими сериями численных экспериментов, широкой сравнительной базой в виде данных полевых наблюдений, учащенных радиолокационных измерений параметров облаков, данных регистрации молний, внутриоблачных разрядов.

Достоверность численной модели обеспечена корректностью постановки задачи, системы уравнений, начальных и граничных условий, применением хорошо зарекомендовавших себя численных методов, которые успешно используются при моделировании облаков и решении аналогичных уравнений. Решены различные тестовые задачи, подтверждающие удовлетворительную точность вычислительных схем и алгоритмов, а также адекватность разработанной модели в целом.



При реализации модели на ЭВМ использованы современные интегрированные системы разработки математических моделей и прикладного программного обеспечения, которые включают средства отладки и детального контроля расчетных параметров.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается сравнением полученных характеристик облаков с данными полевых наблюдений и радиолокационных измерений.

**Апробация работы.** Полученные в ходе выполнения диссертационного исследования результаты докладывались и обсуждались на: Научной конференции институтов Росгидромета, посвященной 50-летию отдела физики облаков Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова «Теоретические и экспериментальные исследования конвективных облаков», г. Санкт-Петербург, 2008; Международном научно-практическом семинаре «Экологические проблемы современности», г. Майкоп, 2009; Международном Российско-Абхазском симпозиуме «Уравнения смешанного типа и родственные проблемы анализа и информатики» и VII Школе молодых ученых «Нелокальные краевые задачи и проблемы современного анализа и информатики», г. Нальчик – Приэльбрусье, 2009; Международной научно-практической конференции «Инженерные системы-2009», г. Москва, 2009; Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, г. Нальчик, 2011; VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству, г. Санкт-Петербург, 2012; Международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата», г. Ставрополь, 2013 г; Международном симпозиуме «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», посвященном 20-летию КБНЦ РАН, г. Нальчик, 2013; Конференции молодых ученых Высокогорного геофизического института, посвященной 100-летию профессора Г.К. Сулаквелидзе, г. Нальчик, 2013; AMS 14th Conference on Atmospheric Radiation, Boston, MA, 2014; Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, г. Нальчик, 2014; Второй международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата», г. Ставрополь, 2015; Второй всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, 2015; Международной научно-практической конференции «Глобальные вызовы современности и проблемы устойчивого развития Юга России», г. Нальчик, 2015; Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «ФНЦ «КБНЦ РАН» Иванова П.М., г. Нальчик, 2017; XIV Международной научно-практической конференции «Инновационные научные исследования: теория, методология,

практика», г. Пенза, 2018; Третьей международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата», г. Ставрополь, 2018; Общегеофизических семинарах и Итоговых сессиях Ученого совета ФГБУ «Высокогорный геофизический институт».

**Публикации.** Основные результаты работы опубликованы в 114 работах, в том числе 28 - в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 9 работ в изданиях SCOPUS и Web of Science, 3 монографии, 6 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 335 страниц, включая список литературы из 282 наименований работ.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель и задачи диссертационной работы, характеризуются теоретические и методологические основы исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также апробация работы.

**В первой главе** представлены результаты анализа современного состояния исследований по физике конвективных облаков, по состоянию математического моделирования облаков с учетом электрических процессов, перспективам исследований в этом направлении.

Проведенный обзор состояния моделирования конвективных облаков с учетом электрических процессов в нашей стране и за рубежом показал, что электрические процессы учитываются еще недостаточно, особенно в моделях с детальной микрофизикой. Основные проблемы заключаются в формализации процессов электризации и учете влияния электрических характеристик облака на микроструктуру облаков. Недостаточно учитывается взаимодействие физических процессов в облаках.

По результатам анализа состояния проблемы математического моделирования облаков, в частности, с учетом электрических процессов, сформулированы задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** представлена разработанная в ходе выполнения исследования трехмерная нестационарная численная модель конвективных облаков с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Модель отличается от аналогов тем, что в ней используется детальная микрофизика с несколькими десятками градаций размеров жидких и твердых частиц, учитываются: накопление зарядов в облаке, потенциал и напряженность электрического поля, электрическая коагуляция облачных частиц.

Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений движения, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска. В

уравнениях учитываются адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов. Микрофизический блок модели описывает процессы нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками, а также взаимодействие облачных частиц под влиянием электрического поля облака.

Постановка задачи математической модели конвективного облака включает следующие уравнения термодинамики, микрофизики и электростатики:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)u = -\nabla \pi' + \Delta' u + lv, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)v = -\nabla \pi' + \Delta' v - lv, \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)w = -\nabla \pi' + \Delta' w + g\left(\frac{\theta'}{\theta_0} + 0,61s' - Q_s\right), \quad (3)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma w, \quad (4)$$

уравнения термодинамики

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\theta = \frac{L_K}{c_p T} \frac{\partial M_K}{\partial t} + \frac{L_C}{c_p T} \frac{\partial M_C}{\partial t} + \frac{L_3}{c_p T} \frac{\partial M_3}{\partial t} + \Delta' \theta, \quad (5)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)s = -\frac{\partial M_K}{\partial t} - \frac{\partial M_C}{\partial t} + \Delta' s, \quad (6)$$

уравнения для функций распределения по массам капель, кристаллов и осколков замерзания:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + v \frac{\partial f_1}{\partial y} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_K + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{KT} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{AK} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{LP} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_3 + \Delta' f_1 + I_1, \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + v \frac{\partial f_2}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_C + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{AK} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_3 + \Delta' f_2 + I_2 + I_{AB}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial t} + u \frac{\partial f_3}{\partial x} + v \frac{\partial f_3}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_3}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_3 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{AK} + \Delta' f_3, \quad (9)$$

уравнения для расчета количества электричества

$$\rho_- = a_2 \int_0^\infty m f_2 dm - \lambda_2 E - \gamma_2 \sum_i \rho_-^i, \quad (10)$$

$$\rho_+ = a_3 \int_0^\infty m f_3 dm - \lambda_3 E - \gamma_3 \sum_i \rho_+^i$$

уравнение Пуассона для потенциала электростатического поля

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho_e}{\epsilon_0}, \quad (11)$$

Начальные условия для уравнений (1)-(11) имеют следующий вид:

$$u(\vec{r}, 0) = u_0(\vec{r}), v(\vec{r}, 0) = v_0(\vec{r}), w(\vec{r}, 0) = w_0(\vec{r}), \theta(\vec{r}, 0) = \theta_0(\vec{r}), s(\vec{r}, 0) = s_0(\vec{r}), \quad (12)$$

$$f_1(\vec{r}, m, 0) = f_2(\vec{r}, m, 0) = f_3(\vec{r}, m, 0) = 0, \rho_-(\vec{r}, 0) = \rho_+(\vec{r}, 0) = 0. \quad (13)$$

Граничные условия:

$$u(\vec{r}, t) = u_0(\vec{r}), v(\vec{r}, t) = v_0(\vec{r}), w(\vec{r}, t) = w_0(\vec{r}), \theta(\vec{r}, t) = \theta_0(\vec{r}), s(\vec{r}, t) = s_0(\vec{r}) \Big|_{x=0, L_x; y=0, L_y; z=L_z}$$

$$u(\vec{r}, t) = v(\vec{r}, t) = w(\vec{r}, t) = 0, \theta(\vec{r}, t) = \theta_0(\vec{r}), s(\vec{r}, t) = s_0(\vec{r}) \Big|_{z=0} \quad (14)$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \Big|_{x=0, L_x; y=0, L_y; z=L_z}$$

$$\frac{\partial f_1(\vec{r}, m, t)}{\partial z} = \frac{\partial f_2(\vec{r}, m, t)}{\partial z} = \frac{\partial f_3(\vec{r}, m, t)}{\partial z} = 0 \Big|_{z=0} \quad (15)$$

$$\frac{\partial U(\vec{r}, t)}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0, L_x}, \frac{\partial U(\vec{r}, t)}{\partial y} = 0 \Big|_{y=0, L_y}, \frac{\partial U(\vec{r}, t)}{\partial z} = 0 \Big|_{z=L_z}, U(\vec{r}, t) = 0 \Big|_{z=0} \quad (16)$$

Система уравнений применяется для пространственно-временной области

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z, \quad 0 \leq m < \infty, \quad t > 0. \quad (17)$$

Используются обозначения:

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \equiv u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}, \quad \Delta' = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z},$$

$\vec{r} = \{x, y, z\}$  - вектор координат;  $\vec{V} = \{u, v, w\}$  - вектор скорости;  $u(\vec{r}), v(\vec{r}), w(\vec{r})$  - компоненты вектора скорости;  $l$  - параметр, учитывающий инерционные силы;  $\theta(\vec{r})$  - потенциальная температура;  $\pi(\vec{r}) = c_p \bar{\theta} (P(z)/1000)^{R/c_p}$  - безразмерное давление;  $\bar{\theta}$  - средняя потенциальная температура;  $R$  - газовая постоянная;  $s(\vec{r})$  - удельная влажность воздуха;  $Q_s(\vec{r})$  - суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке;  $\sigma(z)$  - параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой;  $P(z)$  и  $T(\vec{r})$  - соответственно давление и температура;  $c_p$  - теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $L_K, L_C, L_3$  - соответственно удельная теплота конденсации, сублимации и замерзания;  $\pi'(\vec{r}), \theta'(\vec{r}), s'(\vec{r})$  - отклонения безразмерного давления, потенциальной температуры и удельной влажности от их фоновых значений в окружающей атмосфере  $\pi_0(\vec{r}), \theta_0(\vec{r}), s_0(\vec{r})$ ;  $\frac{\delta M_K}{\delta t}, \frac{\delta M_C}{\delta t}$  - изменения удельной влажности за счет диффузии пара на капли и кристаллы;  $\frac{\delta M_3}{\delta t}$  - масса капельной воды, замерзающей в единицу времени в единице объема воздуха;  $K(\vec{r})$  - коэффициент турбулентной диффузии.  $V_1(m), V_2(m)$  - установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц;  $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_K, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{КГ}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{АК}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{ДР}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_3$  - изменения функции распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно;  $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_C, \left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{АК}, \left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_3$  - изменения функции распределения кристаллов за счет сублимации, аккреции и замерзания капель;  $\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_3, \left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{АК}$  - изменения функции распределения  $f_3(\vec{r}, m, t)$  за счет образования осколков при спонтанном замерзании переохлажденных облачных капель и их аккреции с кристаллами;  $I_1$  и  $I_2$  - источники капель и

кристаллов;  $I_{AB}$  – источник искусственных кристаллов при активном воздействии;  $\rho_e(\vec{r}, t)$  – суммарный объемный электрический заряд,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума.

Для границ пространственной области используются обозначения  $0, L_x, 0, L_y$  и  $0, L_z$ .

Для описания коагуляционных процессов в облаке применяется интегро-дифференциальное уравнение в виде:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{KT} = -f_1(\vec{r}, m, t) \int_0^{\infty} \beta_1(m, m') \cdot f_1(\vec{r}, m', t) dm' + \int_0^{m/2} f_1(\vec{r}, m - m', t) \beta_1(m, m') f_1(\vec{r}, m', t) dm', \quad (18)$$

где  $\beta_1(m, m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_1(m) - V_1(m')| \cdot e_1(m, m')$ ;  $r(m)$  и  $r(m')$  – радиусы сталкивающихся частиц;  $V_1(m)$  и  $V_1(m')$  – их скорости падения;  $e_1(m, m')$  – коэффициент захвата для капель.

Расчет взаимодействия капель и кристаллов проводится на основе следующих соотношений:

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{AK} = -f_1(\vec{r}, m, t) \int_0^{\infty} \beta_2(m, m') \cdot f_2(\vec{r}, m', t) dm', \quad (19)$$

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{AK} = -f_2(\vec{r}, m, t) \int_0^{\infty} \beta_2(m, m') \cdot f_1(\vec{r}, m', t) dm' + \int_0^m \beta_2(m, m - m') f_2(\vec{r}, m - m', t) f_1(\vec{r}, m', t) dm', \quad (20)$$

где  $\beta_2(m, m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_1(m) - V_2(m')| \cdot e_2(m, m')$ ,  $e_2(m, m')$  – коэффициент захвата для капель и кристаллов. Принято условие, что столкновение кристаллов с каплями приводит к замерзанию последних.

При численном решении уравнений коагуляции применяются преобразования переменных  $m = m_0 \exp[3 \cdot (I - 1) / I_0]$ ,  $I_0 = 6 / \ln 2$  и функции распределения  $G(I) dI = mf(m) dm$ . Значения функции  $G(I)$  в промежутке между узлами рассчитываются с помощью интерполяции значений функции в близлежащих узлах.

Изменение функции  $f_1(\vec{r}, m, t)$  вследствие дробления капель рассчитывается по формуле:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{DP} = -P_{DP}(m) f_1(\vec{r}, m, t) + \int_m^{\infty} Q(m, m') P_{DP}(m') \cdot f_1(\vec{r}, m', t) dm', \quad (21)$$

где  $P_{DP}(m)$  есть вероятность распада в единицу времени капли массой  $m$ ,  $Q(m, m')$  есть вероятность образования капли массой  $m$  при распаде капли массой  $m'$ . Для расчета  $P_{DP}(m)$  используется выражение:

$$P_{DP}(m) = 2,94 \cdot 10^{-7} \exp(34 r(m)). \quad (22)$$

Функция  $Q(m, m')$  рассчитывается по формуле

$$Q(m, m') = \frac{145,37}{m} \frac{r(m)}{r(m')} \exp\left(-7 \frac{r(m)}{r(m')}\right). \quad (23)$$

Расчет изменений функций  $f_1(\bar{r}, m, t)$  и  $f_2(\bar{r}, m, t)$  за счет кристаллизации капель проводится с использованием функции  $R_{3M}(\bar{r}, m)$  - вероятности замерзания в единицу времени капли массой  $m$  в точке  $(\bar{r})$ :

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_3 = -\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_3 = -R_{3M}(\bar{r}, m) f_1(\bar{r}, m, t), \quad (24)$$

$$R_{3M}(\bar{r}, m) = A_{3M} \cdot \exp[B_{3M} \cdot (T_m(m) - T_B(\bar{r}))], \quad (25)$$

где  $A_{3M}, B_{3M}$  - параметры;  $T_m(m)$  — медианная температура замерзания капель массой  $m$ ;  $T_B(\bar{r})$  — температура воздуха в указанной точке.

Образование новых капель на ядрах конденсации учитывает слагаемое  $I_1(\bar{r}, m, t)$ . Этот процесс описывается формулой:

$$I_1(\bar{r}, m, t) = \frac{\alpha(q_a(\bar{r}) - q_n(\bar{r}))\psi_1^0(\bar{r}, m)}{q_w(\psi_1^0)}. \quad (26)$$

где  $q_a(\bar{r})$  — влажность воздуха в точке  $(\bar{r})$ ;  $q_n(\bar{r})$  — влажность насыщенного водяного пара в этой же точке;  $\alpha$  - численный коэффициент;  $\psi_1^0(\bar{r}, m)$  — заданное распределение капель в той же точке;  $q_w(\psi_1^0)$  - водность заданного распределения капель. Процесс образования кристаллов на ядрах сублимации  $I_2(\bar{r}, m, t)$  описывается аналогичным выражением.

Учет процессов конденсации и сублимации осуществляется по формулам:

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_K = -\frac{\partial}{\partial m} \left( f_1(\bar{r}, m, t) \frac{dm}{dt} \right), \quad (27)$$

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_C = -\frac{\partial}{\partial m} \left( f_2(\bar{r}, m, t) \frac{dm}{dt} \right). \quad (28)$$

Скорость изменения масс облачных частиц определяется через скорость изменения их радиусов:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi\rho r^2 \frac{dr}{dt}. \quad (29)$$

Формулы для описания роста (испарения) частиц имеют следующий вид:

$$\frac{dr_w}{d\tau} = D \frac{\rho_{\text{ex}}}{\rho_w} \frac{1}{r_w} \frac{\mu}{M} \frac{e_w}{P} (f_{\text{ex}} - 1), \quad (30)$$

$$\frac{dr_i}{d\tau} = D \frac{\rho_{\text{ex}}}{\rho_i} \frac{1}{r_i} \frac{\mu}{M} \frac{e_w}{P} \left( f_{\text{ex}} - \frac{e_i}{e_w} \right), \quad (31)$$

где  $D$  - коэффициент молекулярной диффузии пара;  $r_w$  и  $r_i$  - размеры (радиусы) капель и ледяных частиц соответственно;  $P$  - давление воздуха;  $\rho_w, \rho_i, \rho_{\text{ex}}$  - плотность воды, льда и воздуха соответственно;  $\mu, M$  - молекулярные массы водяного пара и воздуха;  $e_w, e_i$  - давление насыщенного

водяного пара при температуре облака над водой и льдом;  $f_{ex}$  - относительная влажность воздуха.

Функция  $I_{AB}(\vec{r}, m, t)$  описывает образование искусственных кристаллов при активном воздействии кристаллизующим реагентом. Ее вид определяется формой и характеристиками источника искусственных частиц, а также свойствами самих частиц. При моделировании естественного хода эволюции облака  $I_{AB}(\vec{r}, m, t) = 0$ . В случае с активным воздействием задается конкретный вид функции  $I_{AB}(\vec{r}, m, t)$ , соответствующий способу внесения реагента.

В модели детально учитываются процессы электризации облачных частиц на основе полученных закономерностей развития грозовой деятельности в облаках и значений коэффициентов разделения зарядов, связанных с замерзанием капель воды, ростом крупы и градин, и взаимодействием градин с кристалликами льда и переохлажденными каплями.

За счет микрофизических процессов замерзания капель и аккреции в облаке идет накопление отрицательного заряда на ледяных частицах. Одновременно формируется положительный заряд, состоящий из зарядов отдельных частиц - осколков замерзания капель.

Для замерзающих капель, диаметр которых больше 200 мкм, с достаточной точностью процесс электризации описывается выражением

$$q(m) = a_q \cdot m, \quad (32)$$

где  $m$  - масса замерзшей капли,  $a_q$  - коэффициент пропорциональности, значение которого меняется в зависимости от содержания примесей в капле и температуры ее замерзания ( $a_q \approx 3,5 \cdot 10^{-10}$  Кл/г при  $T = -8...-16$  °C).

Образование осколков при замерзании капель учитывается следующим образом:

$$\left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3 = \int_m^\infty n(m, m') R_{3M}(\vec{r}, m', t) f_1(\vec{r}, m', t) dm', \quad (33)$$

где  $n(m, m')$  - число ледяных осколков массы  $m$ , образующихся при замерзании капель массы  $m'$ ,  $R_{3M}(\vec{r}, m', t)$  - вероятность замерзания капель массой  $m'$  в единицу времени.

Образование осколков в процессе аккреции ледяных кристаллов с облачными каплями описывается формулой:

$$\left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{AK} = \int_m^\infty n(m, m') R_{21}(\vec{r}, m', t) dm', \quad (34)$$

где  $R_{21}(\vec{r}, m', t) = f_1(\vec{r}, m', t) \cdot \int_0^\infty \beta_2(m', \xi) f_2(\vec{r}, \xi, t) d\xi$  - число столкновений кристаллов массой  $\xi$  с каплями массой  $m'$ , приводящих к замерзанию последних и образованию осколков.

Число ледяных осколков  $n(m, m')$  определяется согласно экспериментальным зависимостям выбросов микрочастиц от размера

замерзающей капли. Использовались данные, полученные в Высокотомном геофизическом институте А.Х. Аджиевым с соавторами, и из литературных источников.

Микроскопические осколки замерзания выносятся потоками в верхнюю часть облака, где образуется преимущественно положительный объемный заряд  $\rho_+(\vec{r}, t)$ . Область сосредоточения отрицательно заряженных ледяных частиц образует зону преимущественно отрицательного объемного заряда  $\rho_-(\vec{r}, t)$ .

Объемные заряды на временном шаге рассчитывались по формулам:

$$\begin{aligned}\rho_-(\vec{r}, t) &= a_2 \int_0^{\infty} m f_2(\vec{r}, m, t) dm - \rho_2(\vec{r}), \\ \rho_+(\vec{r}, t) &= a_3 \int_0^{\infty} m f_3(\vec{r}, m, t) dm - \rho_3(\vec{r}),\end{aligned}\quad (35)$$

где  $a_2$  и  $a_3$  – коэффициенты разделения зарядов,  $\rho_2(\vec{r})$  и  $\rho_3(\vec{r})$  – уменьшение объемных зарядов в результате тока проводимости атмосферы и разрядов:

$$\begin{aligned}\rho_2(\vec{r}) &= \lambda_2 E(\vec{r}) + \gamma_2 \sum_i \rho_-(\vec{r}, t_i), \\ \rho_3(\vec{r}) &= \lambda_3 E(\vec{r}) + \gamma_3 \sum_i \rho_+(\vec{r}, t_i).\end{aligned}\quad (36)$$

При моделировании на каждом временном шаге рассчитываются объемные заряды в облаке, потенциал электростатического поля, создаваемого зарядами, а также горизонтальные  $E_x(\vec{r})$ ,  $E_y(\vec{r})$  и вертикальная  $E_z(\vec{r})$  составляющие напряженности электрического поля облака.

Значение суммарного (положительного и отрицательного) объемных зарядов  $\rho_e(\vec{r})$  используется для определения потенциала  $U(\vec{r})$  создаваемого ими электростатического поля. Для этого на каждом временном шаге решается трехмерное уравнение Пуассона (11).

Напряженность электрического поля  $\vec{E}(\vec{r})$  определяется по формуле:

$$\vec{E}(\vec{r}) = - \left( \vec{n}_x \frac{\partial U}{\partial x} + \vec{n}_y \frac{\partial U}{\partial y} + \vec{n}_z \frac{\partial U}{\partial z} \right).\quad (37)$$

Значения напряженности электрического поля учитывались в работе для расчета коэффициентов электрической коагуляции облачных частиц. Для этого использовались аппроксимационные формулы, построенные по существующим теоретическим и экспериментальным данным для этого параметра.

Для сопоставления с данными наблюдений в модели рассчитывается радиолокационная отражаемость облака на трех длинах волн: 3, 5 и 10 см. Для расчета отражаемости использовались следующие выражения

$$Z_{rad}(x, y, z) = \frac{\lambda_{rad}^4}{\pi^5} \left( \int_0^{Rm} \sigma_1(r, \lambda_{rad}) \cdot f_1(x, y, z, r) \cdot dr + \int_0^{Rm} \sigma_2(r, \lambda_{rad}) \cdot f_2(x, y, z, r) \cdot dr \right),\quad (38)$$



где  $Z_{rad}$  - радиолокационная отражаемость в dBZ,  $\sigma_1(r, \lambda_{rad})$  и  $\sigma_2(r, \lambda_{rad})$  - поперечные сечения обратного рассеяния соответственно для капель и кристаллов радиуса  $r$  на длине волны излучения  $\lambda_{rad}$ .

Система уравнений модели (1)-(38) решалась методами расщепления по физическим процессам и по координатного расщепления.

Результаты тестирования и валидации модели продемонстрировали удовлетворительную точность реализованных численных методов и алгоритмов расчетов, используемых в модели.

Для анализа результатов использовалось оригинальное программное обеспечение трехмерной визуализации расчетных данных, разработанное автором диссертации. Программа визуализации позволяет видеть трехмерный объект моделирования (облако), поворачивать его в вертикальной и горизонтальной плоскости, менять форму представления данных: изоповерхность, изоконтуры, изолинии, векторное поле и т.д., в интересующие исследователя моменты времени. Все это обеспечивается удобным интерфейсом программы, что позволяет не только провести детальный просмотр расчетных данных, но и дать корректную их физическую интерпретацию.

**В третьей главе** приведены результаты исследований формирования термодинамических, микроструктурных и электрических параметров конвективных облаков при различных состояниях атмосферы.

Размеры пространственной области при расчетах задавались от 40 до 80 км по горизонтали и 16 км - по вертикали. Шаг сетки по координатам  $X$ ,  $Y$  составлял 500-1000 м, по  $Z$  - 250-500 м. Ось  $X$  направлена на восток,  $Y$  – на север,  $Z$  – по вертикали. Облако инициировалось заданием импульса у поверхности земли с перегревом  $\Delta T = 1-4^\circ\text{C}$ , форма и размеры импульса также варьировались в численных экспериментах.

Разработанная численная модель конвективного облака с детальной микрофизикой позволяет исследовать формирование микроструктурных характеристик облаков, образование частиц осадков, накопление электрических зарядов и электрическую коагуляцию облачных частиц.

Для детального описания микрофизических процессов используются кинетические уравнения коагуляции для функций распределения частиц по массам. Полученные с помощью такой модели результаты отражают нелинейные эффекты физики облаков, которые невозможно исследовать и оценить при использовании более простых моделей, например, с параметризованной микрофизикой.

При выполнении численных экспериментов были использованы данные аэрологического зондирования в аэропорту Минеральные Воды и, в ряде экспериментов, трехмерные данные по термодинамическим параметрам и горизонтальному ветру. Выбирались дни, когда по факту в радиусе репрезентативности зонда наблюдались ливни, грозы, град. Для сравнения с реальными облаками использовались данные радиолокационных наблюдений с метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С (г. Ставрополь, г.

Минеральные Воды) и МРЛ-5 (г. Нарткала, Кабардино-Балкарская республика).

На рисунке 1 приведены в векторной форме потоки в вертикальной плоскости, проходящей через облако. Вокруг облака отмечаются нисходящие потоки. С наветренной стороны они усиливаются внешним ветром, за облаком могут быть слабее, т.к. за облаком возникает гидродинамическая тень.

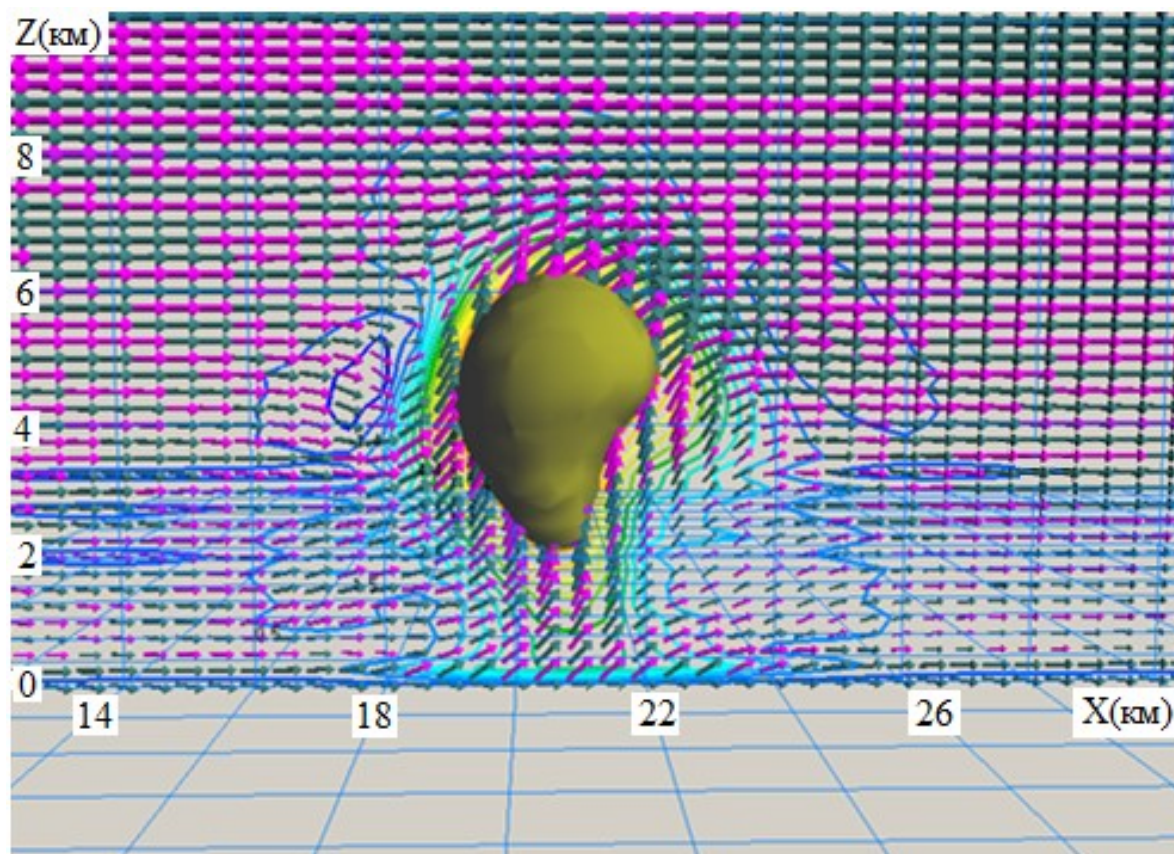


Рисунок 1 – Поле скоростей воздушных потоков в вертикальной плоскости, проходящей через облако. Значения представлены векторами. Приведены изоповерхность  $W=10$  м/с, горизонтальная и вертикальная сетки с ячейками  $2 \times 2$  км

На рисунке 2 приведены результаты моделирования изменения фонового ветра в горизонтальной плоскости при наличии конвективного облака. Поле горизонтального ветра взаимодействует с облаком: поток растекается перед облаком, а в тыловой области частично заворачивает, попадая в облако.

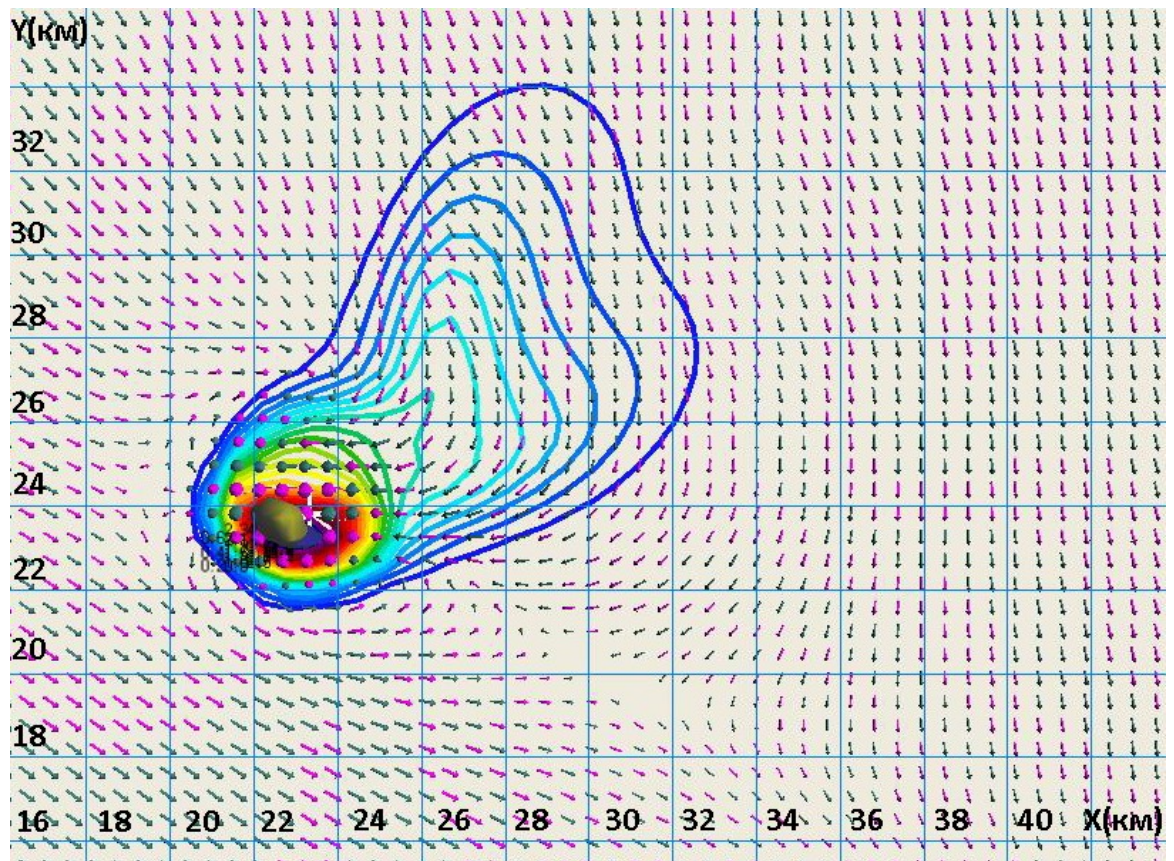


Рисунок 2 – Обтекание конвективного облака горизонтальным ветром и разворот потоков, наблюдаемые на уровне  $z = 4$  км. Также приведены изолинии радиолокационной отражаемости

Численные эксперименты, выполненные по различным данным зондирования, показали, что характеристики получающегося по трехмерной модели облака чувствительны к вертикальным распределениям температуры и влажности в атмосфере, и трехмерной структуре горизонтального ветра. При неустойчивой стратификации получались мощные облака смешанного типа, верхняя часть которых при высоте верхней границы более 10 км состояла из ледяных кристалликов. Выполнено сравнение характеристик модельного облака с данными наблюдений, отмечалось качественное и количественное согласие расчетных данных с наблюдаемыми в полевых экспериментах.

С помощью разработанных средств трехмерной визуализации получена картина развития облака (рисунок 3).

Проведен анализ водности, ледности и других параметров в рассматриваемой пространственной области в различные моменты развития облака.

На рисунке 4 приведены область сосредоточения крупнокапельной фракции, области формирования мелких, средних и крупных ледяных частиц на 40-й минуте развития облака. Высота облака составляет 11 км, максимальная отражаемость – 53 dBZ.

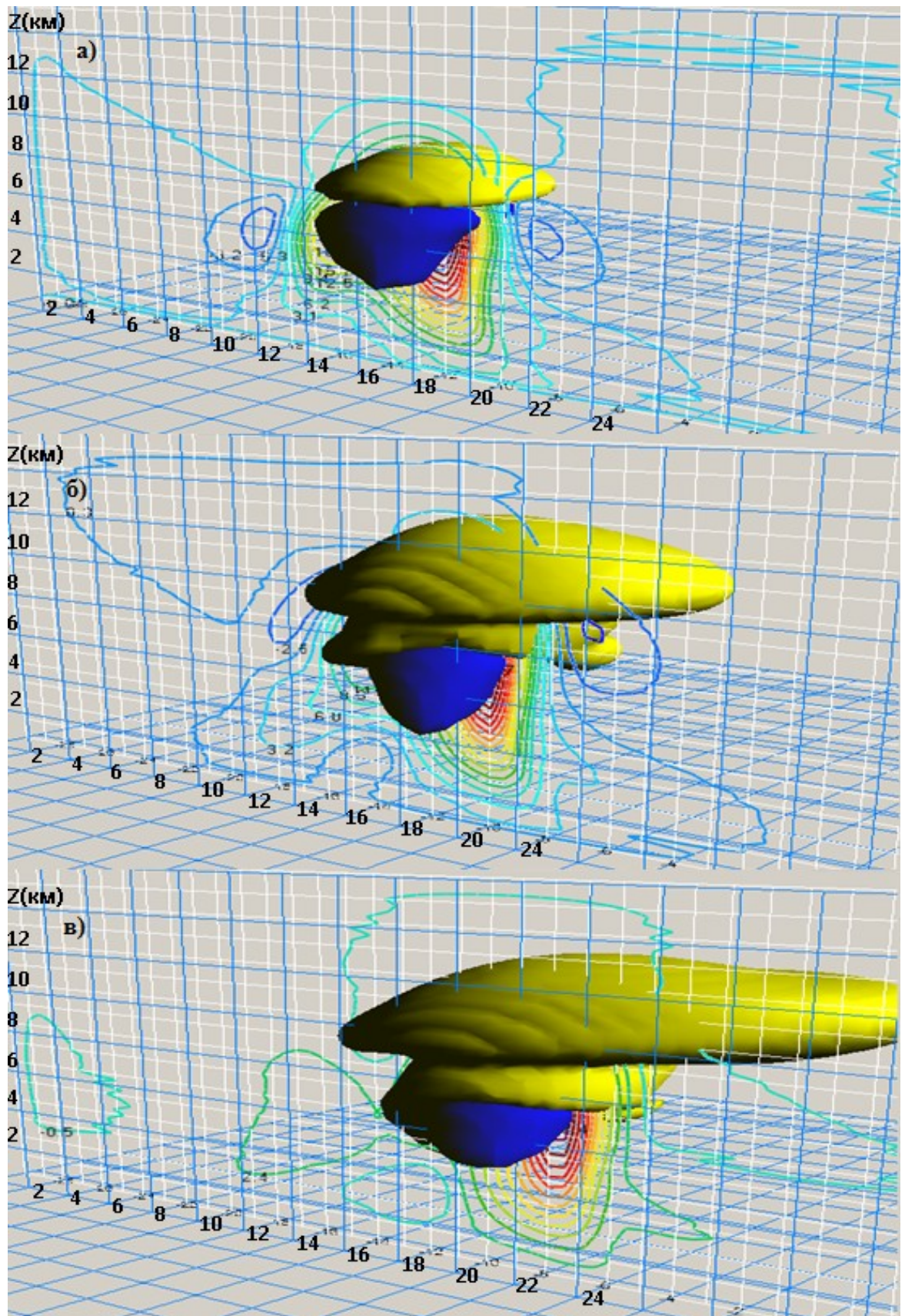


Рисунок 3 – Изоповерхности водности (синий) крупные капли и ледности (желтый) ледяные частицы в последовательные моменты времени: (а) - 20 мин, (б) - 30 мин, (в) - 40 мин. Вспомогательная сетка 2х2 км

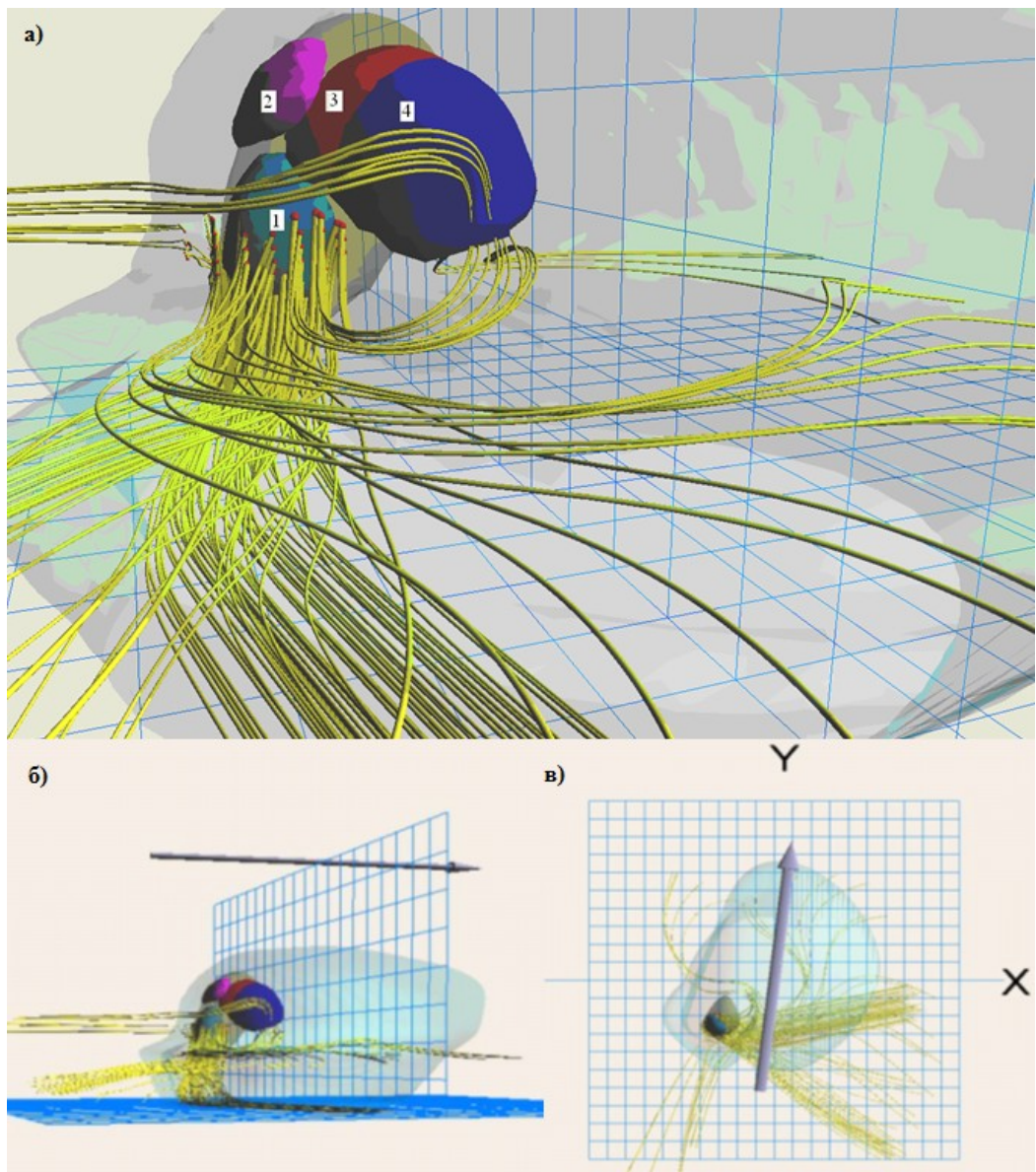


Рисунок 4 – Линии тока, изоповерхность отражаемости  $Z_{rad} = 35$  dBZ и области сосредоточения крупных капель (1), мелких (2), средних (3) и крупных (4) кристаллов. На рисунках в нижней части приведены вид сбоку (б) и сверху (в) на облако во всей области моделирования. Стрелкой изображено направление ведущего потока. Вспомогательная сетка 2x2 км

По результатам моделирования были определены потоки, питающие облако в стадии зрелости. Наблюдается вток: из подветренной области (уровень 4 км), справа от направления ведущего потока (уровень 0-0.5 км), с наветренной стороны, справа от облака под углом приблизительно  $45^\circ$  (уровень 3 км).

Приблизительно к 40-й минуте облако достигает стадии максимального развития, появляются частицы жидких и твёрдых осадков. Максимальная скорость восходящего потока  $W_m = 29$  м/с отмечается на уровне  $z = 6000$  м, скорость нисходящего потока равна  $-3,2$  м/с. Столб восходящего потока имеет небольшой наклон по направлению горизонтального потока воздуха.

Начало образования осадков в момент времени 40 мин представлено на рисунке 5. На рисунке 5.а изображены изолинии водности, на рис. 5.б. приведены изолинии ледности.

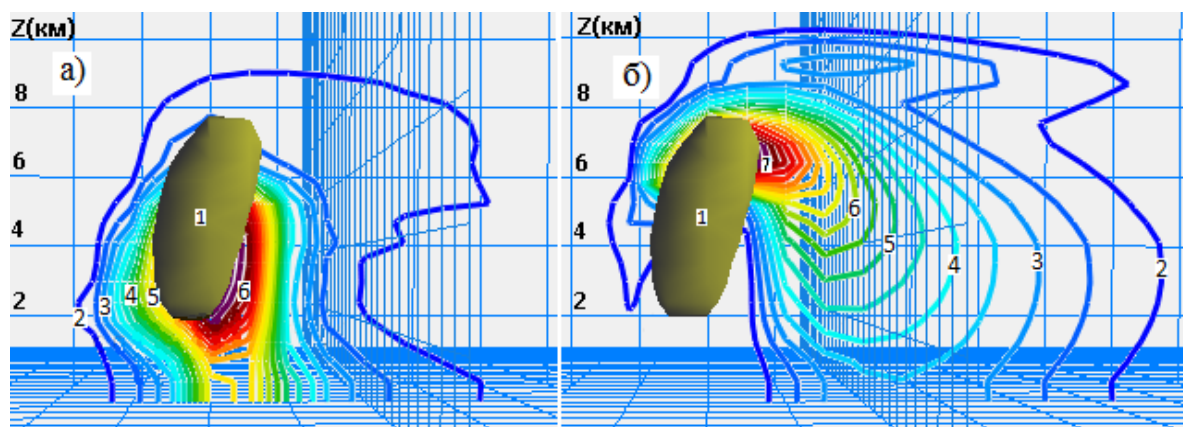


Рисунок 5 – Изолинии водности (а) и лёдности (б) на 40-й минуте развития облака и изоповерхность  $w=10$  м/с (1): 2:  $q_v=1,6$  г/м<sup>3</sup>; 3:  $q_v=3,4$  г/м<sup>3</sup>; 4:  $q_v=4,2$  г/м<sup>3</sup>; 5:  $q_v=6,1$  г/м<sup>3</sup>; 6:  $q_v=9,95$  г/м<sup>3</sup> – максимум водности; 2:  $q_l=0,2$  г/м<sup>3</sup>; 3:  $q_l=0,8$  г/м<sup>3</sup>; 4:  $q_l=1,2$  г/м<sup>3</sup>; 5:  $q_l=1,5$  г/м<sup>3</sup>; 6:  $q_l=1,8$  г/м<sup>3</sup>; 7:  $q_l=3,80$  г/м<sup>3</sup> – максимум ледности

Формирование и накопление электрических зарядов в облаке происходит в результате замерзания капель, аккреции (взаимодействия капель и кристаллов) и при столкновениях кристаллов. Вследствие разных скоростей падения в воздухе микроосколков (заряжающихся преимущественно положительно) и более крупных частиц, крупы и града (заряжающихся преимущественно отрицательно) происходит пространственное разделение зарядов: в предвершинной части облака преобладает положительный объёмный заряд, ниже — отрицательный. Плотность положительного заряда на 20-й минуте достигала  $2,8 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>, отрицательного —  $1,5 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>, электрический потенциал равнялся  $1,4 \cdot 10^9$  В. Компоненты  $E_x$ ,  $E_y$  напряжённости поля составляли около 1300 В/см,  $E_z \approx 2000$  В/см. По результатам моделирования исследовано пространственное распределение суммарного объёмного заряда в облаке в различные моменты времени (рисунки 6 и 7). Рассчитываемая в каждый момент времени в узлах пространственной сетки напряжённость электростатического поля учитывалась при вычислении значений коэффициентов коагуляции капель и кристаллов.

С течением времени заряд в облаке и, соответственно, электростатический потенциал увеличиваются. Максимальный электрический потенциал, полученный в расчётах, составлял более  $2 \cdot 10^9$  В. Область максимума потенциала находится в верхней фронтальной части облака в районе «наковальни». Напряжённость электростатического поля на 40-й минуте составляет  $1600 \div 2000$  В/см.

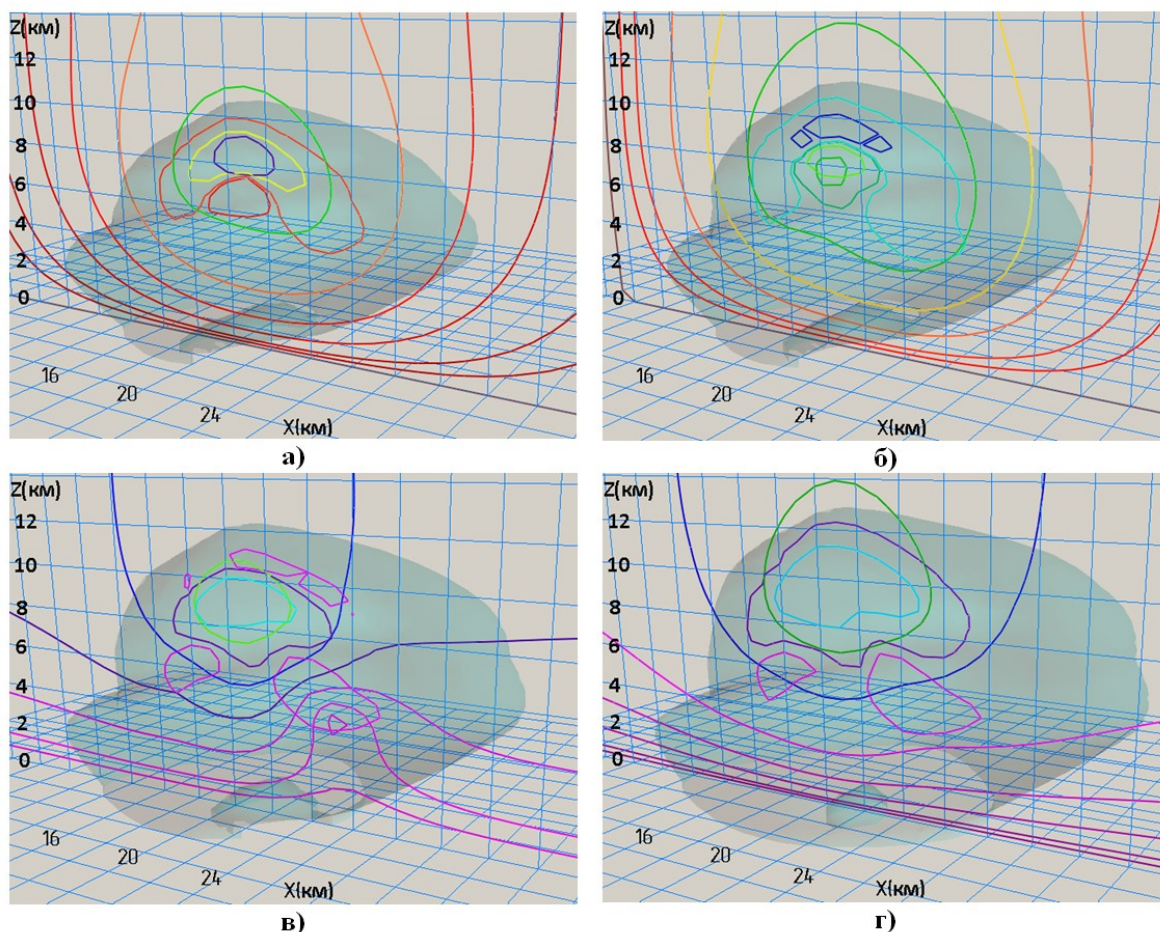


Рисунок 6 - Изолинии объемного заряда и потенциала в вертикальной плоскости, проходящей через облако, на фоне изоповерхности радиолокационной отражаемости  $Z_{rad} = 10$  dBZ, в моменты времени: а)  $t=30$  мин, б)  $t=33,5$  мин, в)  $t=37$  мин, г)  $t=40,5$  мин. Изолинии объемных зарядов (замкнутые контуры) имеют значения:  $-2.0 \cdot 10^{-9}$ ,  $-1.0 \cdot 10^{-9}$ ,  $-1.0 \cdot 10^{-10}$ ,  $1.0 \cdot 10^{-10}$ ,  $1.0 \cdot 10^{-9}$ ,  $2.0 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>. Изолинии потенциала (в порядке от внешнего контура к центру):  $-5.0 \cdot 10^8$ ,  $-2.5 \cdot 10^8$ ,  $-1.0 \cdot 10^8$ ,  $-5 \cdot 10^7$ ,  $-2.5 \cdot 10^7$ ,  $-1.0 \cdot 10^7$ ,  $-5.0 \cdot 10^6$ ,  $5.0 \cdot 10^6$ ,  $1.0 \cdot 10^7$ ,  $2.5 \cdot 10^7$ ,  $5.0 \cdot 10^7$ ,  $1.0 \cdot 10^8$ ,  $2.5 \cdot 10^8$ ,  $5.0 \cdot 10^8$  В

Осадки образуются в верхней части восходящего потока, затем происходит их дальнейший рост и выпадение в стороне (впереди и левее) от восходящего потока. На рисунке 8 приведена радиолокационная отражаемость  $Z_{rad}=45$  dBZ на 50-й минуте развития, присутствует навес радиоэхо, который наблюдается в реальных грозоградовых облаках.

При наличии электрического поля и зарядов на частицах коэффициент коагуляции облачных частиц значительно возрастает и при соответствующих условиях может превышать 1,0 и более.

Были проведены численные эксперименты с учётом электрической коагуляции облачных частиц и без её учёта. Сравнение времени образования осадков в этих двух случаях показало, что за счёт электрической коагуляции время роста частиц осадков в мощном конвективном облаке существенно сокращается на 10-14 минут ( 20÷30 % ).

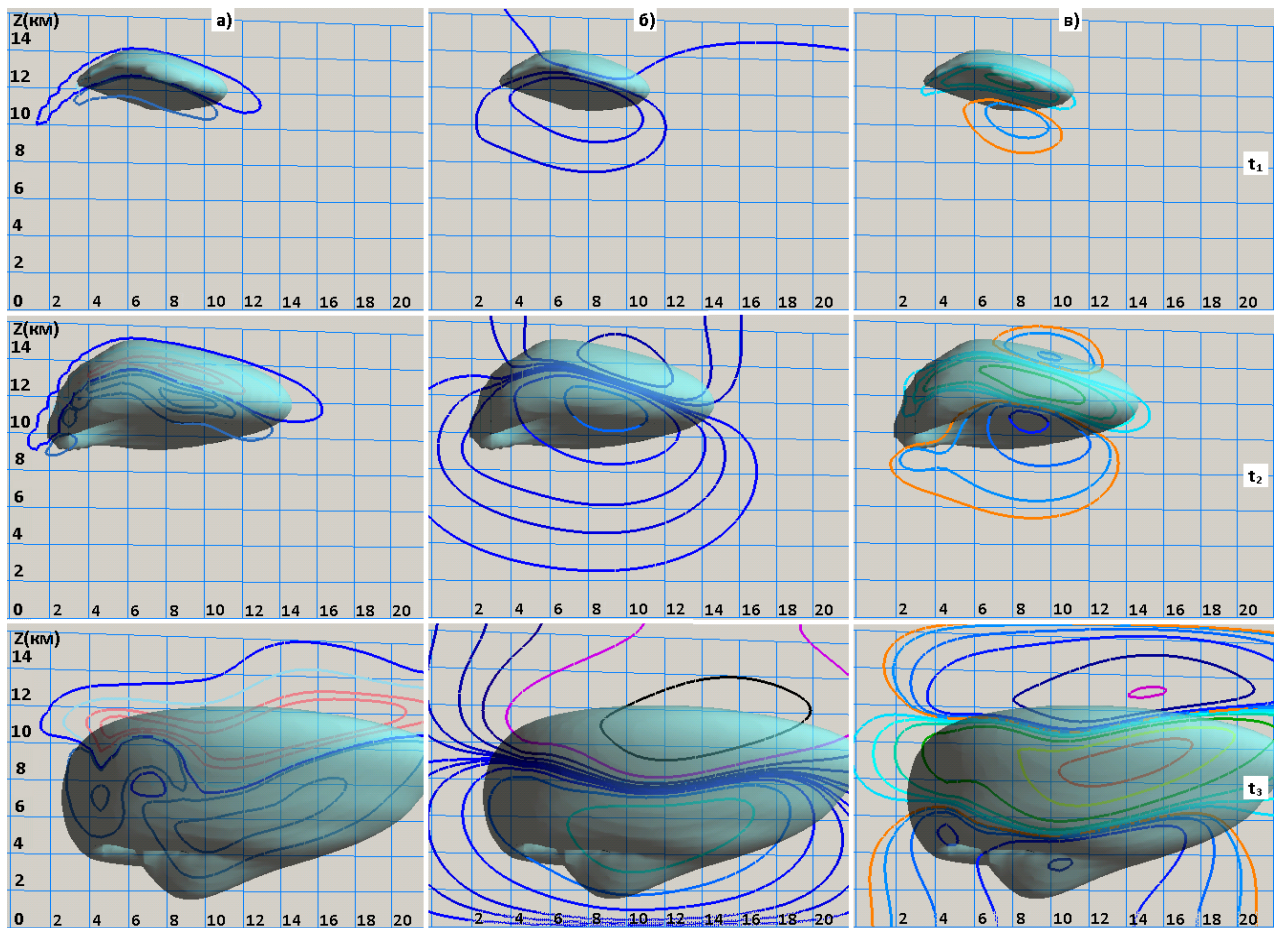


Рисунок 7 – Пространственное распределение объемного заряда (а), потенциала (б) и напряженности поля (в) в облаке для трех моментов времени ( $t_1=20$ ,  $t_2=30$ ,  $t_3=40$  мин)

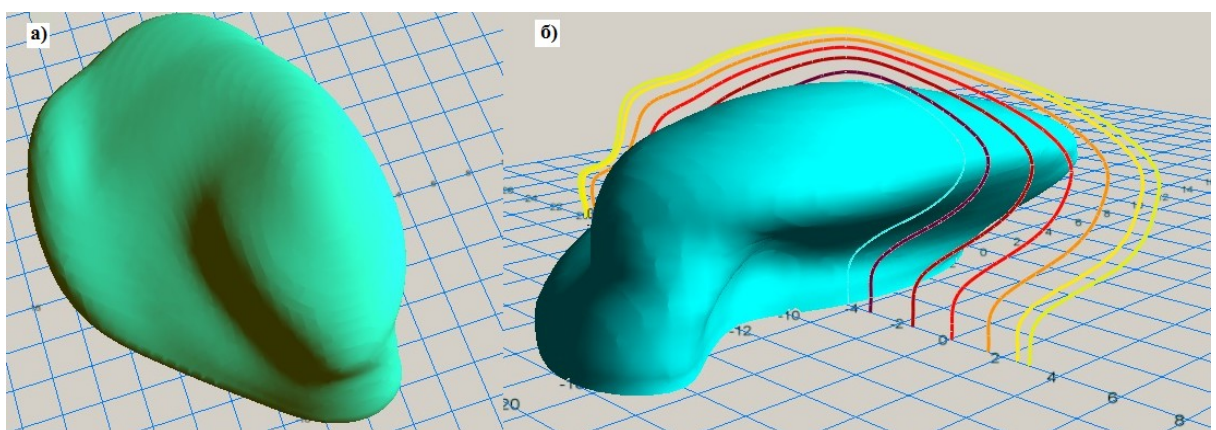


Рисунок 8 – Изоповерхность радиолокационной отражаемости  $Z_{rad}=45$  dBZ на 50-й минуте развития: а) вид сверху, б) вид сбоку. На рисунке б) отмечается нависающее радиоэхо

Результаты расчётов на основе трёхмерной модели с детальным учётом гидродинамических, термодинамических, микрофизических и электрических процессов показывают, что эти процессы в конвективных облаках взаимно влияют друг на друга. Это нелинейное взаимодействие имеет весьма



сложный характер и играет важную роль в формировании микроструктуры облаков. Динамические процессы вызывают деформацию полей термодинамических параметров в облаке, которые, в свою очередь, определяют микрофизические процессы и рост частиц осадков. Электрические параметры влияют на развитие осадков. В численных экспериментах получено, что в облаке наблюдается положительная обратная связь между ростом массы ледяных частиц и объемным электрическим зарядом. Необходимость изучения взаимодействия процессов в конвективных облаках связана с их важной ролью в облако- и осадкообразовании.

**Четвертая глава** посвящена моделированию активного воздействия на конвективные облака.

Проблема искусственного увеличения осадков актуальна для многих регионов земного шара. На Северном Кавказе это север и восток Ставропольского края, степные районы Ростовской области, Калмыкия и другие. Увеличение осадков в период развития культур актуально для увеличения урожаев в этих районах.

В основе подхода к проблеме искусственного регулирования атмосферных осадков путем активного воздействия (АВ) на облака лежит использование существующих в атмосфере неустойчивых состояний при развитии процессов облако- и осадкообразования. В частности, конвективной неустойчивости атмосферы и неустойчивости фазового состояния переохлажденной жидкокапельной облачной влаги.

На основе разработанной модели проведены численные эксперименты для анализа эффективности АВ с целью искусственного увеличения осадков на конвективные облака теплого периода года. Модель описывает рост осадков в конвективном облаке при естественном развитии и при засеве кристаллизующими реагентами. В численных экспериментах варьировались высота внесения реагента (соответственно температура в зоне внесения) и концентрация частиц. Контрольными значениями являлись: интенсивность осадков, их суммарное количество. Для нескольких высотных уровней засева самолетным методом в диапазоне 3500 - 5500 м проведены расчеты при 5 вариантах концентрации искусственных кристаллов для каждого уровня. Получена количественная оценка эффективности АВ для нескольких десятков облаков, рассчитанных с применением различных наборов данных аэрологического зондирования атмосферы.

По результатам анализа численных экспериментов разработаны рекомендации, касающиеся наиболее приемлемых уровня воздействия и дозировки реагента при засеве с самолетов.

Модель в дальнейшем может быть использована в таких работах для корректировки технологии АВ на день воздействия по данным аэрологического зондирования атмосферы.

В главе также представлены некоторые результаты моделирования активного воздействия на градовые облака.

Функция  $u(x, y, z, m, t)$  в системе уравнений модели облака описывает источник искусственных кристаллов, а ее вид зависит от того, какими средствами осуществляется воздействие. В работе моделировался монодисперсный источник:

$$u(x, y, z, m, t) = \gamma(t) \cdot \delta(m - m_{ucm}) \cdot \delta(x - x_{ucm}) \cdot \delta(y - y_{ucm}) \cdot \delta(z - z_{ucm}) \quad (39)$$

где  $\gamma(t)$  — функция, описывающая интенсивность источника искусственных кристаллов;  $m_{ucm}$  — масса искусственного кристалла;  $x_{ucm}, y_{ucm}, z_{ucm}$  — координаты источника в облаке;  $\delta$  — дельта-функция. Моделировались также многоточечные источники, представляющие линейный или площадной засев.

Контрольным значением в численных экспериментах служило число крупных градовых частиц, находящихся в облаке за время развития:

$$F[u] = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} \int_{m_k}^{\infty} \int_0^T f_2(x, y, z, m, t) dx dy dz dm dt \quad (40)$$

где  $m_k$  — масса градины, способной достичь поверхности земли и нанести ущерб.

Для выяснения влияния активного воздействия на градоопасность облака было просчитано множество вариантов, в которых варьировались параметры источника искусственных ледяных кристаллов. Исследовалось изменение микроструктурных характеристик облаков от концентрации искусственных кристаллов, от места воздействия, времени их внесения.

В каждой серии численных экспериментов предварительно проводился расчет формирования микроструктуры облака при естественном развитии. Было получено значение числа крупных градовых частиц, соответствующее естественному развитию облака. Затем проводились расчеты по перебору пространственного положения источника и его мощности.

По результатам численных экспериментов определено изменение градоопасности облаков от: места внесения искусственных кристаллов, их концентрации, геометрии источников, стадии развития облака.

Численные исследования на основе изложенной модели показали, что лучшим с точки зрения предотвращения образования крупных градин в случае площадного источника искусственных кристаллов является область, расположенная в области умеренных (5-10 м/с) восходящих потоков на температурном уровне -10 °С (область 1 на рисунке 9а). На рисунках 9а, 9б приведено микроструктурное строение облака (изоповерхности крупных капель и ледяных кристаллов) на 40-й минуте развития без воздействия (9а) и при внесении кристаллизующего реагента (9б). При воздействии в области засева уменьшилось количество крупных капель и градин, за счет значительного увеличения числа мелких ледяных кристаллов.

**Пятая глава** посвящена разработке программно-математического обеспечения для представления информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С и для объединения радиолокационной, гронопеленгационной и спутниковой информации.

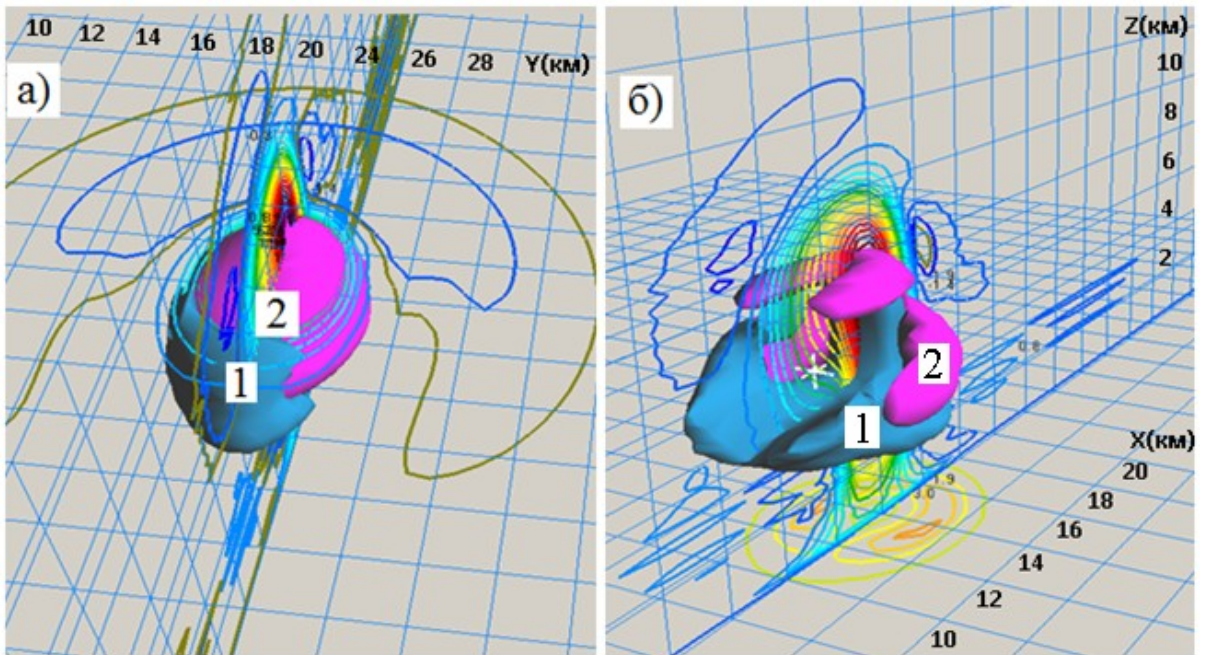


Рисунок 9 – Область образования и роста градин без АВ (слева) и при АВ (справа). Области капель (1) и крупных ледяных кристаллов (2)

С непосредственным участием автора диссертации разработано программное обеспечение «ГИМЕТ-2010», которое предназначено для анализа и отображения данных российского доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С. Программа применяется на сети ДМРЛ Российской Федерации. Карта опасных явлений погоды, полученная при работе программного обеспечения «ГИМЕТ-2010» представлена на рисунке 10.

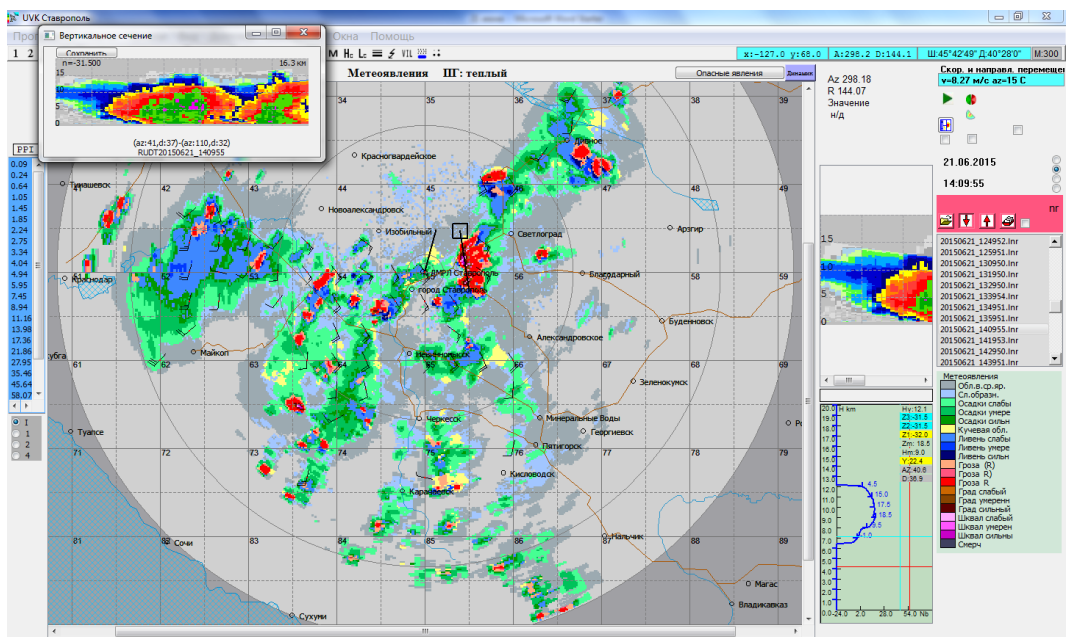


Рисунок 10 – Карта явлений погоды на территории СКФО по доплеровскому радиолокатору ДМРЛ-С ( г.Ставрополь)

Разработано также программно-математическое обеспечение приема, анализа и отображения радиолокационной, грозопеленгационной и спутниковой метеорологической информации. Данные на АРМ поступают по каналам связи от радиолокаторов МРЛ-5, доплеровских локаторов ДМРЛ-С, грозопеленгационной системы и других источников.

Распознавание грозоградовых облаков осуществляется радиолокационными методами с учетом данных грозопеленгации. Экстраполяция перемещения опасных явлений погоды выполняется с учетом исследованных закономерностей развития грозовых облаков.

Прикладное программное обеспечение выполняет следующие функции:

- прием данных;
- отображение пространственной положения и структуры полей облачности и осадков на фоне карты местности;
- отображение карт опасных явлений погоды (ливневые осадки, грозы, град) на фоне карты административных границ районов и областей;
- анализ эволюции облачных структур, направления и скорости перемещения облаков, облачных систем и опасных явлений погоды.

Комплексирование данных от разных источников метеорологической информации обеспечивает более высокую вероятность обнаружения опасных явлений погоды и экстраполяции их перемещения.

На рисунке 11 приведено совмещение грозовых разрядов и радиолокационной отражаемости на территории Северного Кавказа за 10 минутный интервал времени. Справа внизу на рисунке 11 показана цветовая палитра - градации радиолокационной отражаемости.

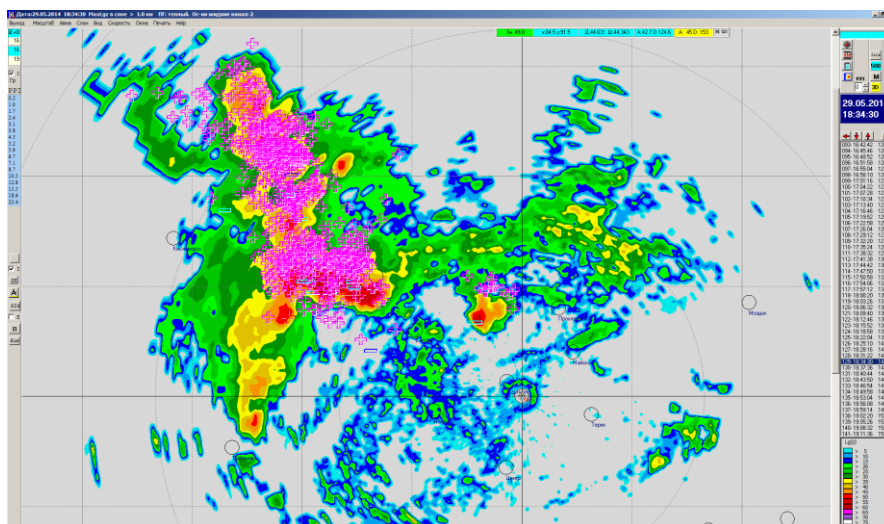


Рисунок 11 - Карта радиолокационной отражаемости и грозовых разрядов на территории ЮФО и СКФО по грозопеленгатору LS8000. Пурпурные крестики обозначают внутриоблачные разряды

Разработаны усовершенствованные алгоритмы распознавания опасных явлений погоды, которые основаны на комплексном анализе поступающей с различных каналов информации (радиолокатор, грозопеленгатор, спутниковые данные).

Для лучшего анализа данных наблюдений автором диссертации разработано прикладное программно-математическое обеспечение трехмерного отображения радиолокационной информации. На рисунке 12 приведены конвективные облака в предгорьях Северного Кавказа по данным радиолокатора МРЛ-5 (изоповерхности соответствуют радиолокационной отражаемости 45 dBZ) . В выделенной области отображается еще рельеф местности.

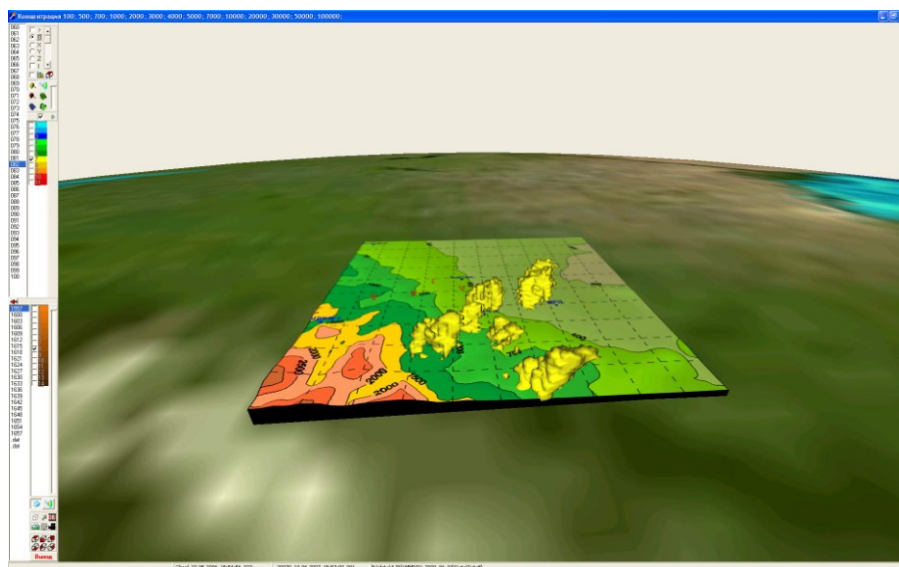


Рисунок 12 – Окно трехмерного отображения радиолокационной информации с картой рельефа местности. На рисунке приведены мощные конвективные ячейки в предгорьях Северного Кавказа

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационного исследования:

- Проведен анализ современного состояния физики конвективных облаков, их трехмерных численных моделей, в том числе с учетом электрических процессов. Определено, что дальнейший прогресс физики конвективных облаков и активных воздействий на них требует решения качественно новых задач, которые заключаются в исследовании облаков в целом, с учетом их эмерджентных свойств. Должны быть проведены исследования взаимодействия физических процессов в облаках и облаков с окружающей атмосферой, формирование микроструктурных параметров при различных условиях. В изучении этих вопросов преимущественным инструментом является математическое моделирование. Показано, что более перспективным методом исследования эволюции параметров облаков при различных условиях является численное моделирование на основе трехмерных моделей с детальной (спектральной микрофизикой). Применение таких моделей позволяет исследовать физику процессов в облаках, проанализировать влияние различных способов внесения реагентов в разные части облака на ход процессов осадкообразования.

- Впервые разработана трехмерная нестационарная численная модель конвективного облака с детальным учетом термогидродинамических,

микрофизических и электрических процессов. В модели учитываются 61 категория размеров капель и 75 категорий размеров кристаллов. Формализован процесс накопления электрического заряда при замерзании капель и аккреции. Разработаны алгоритмы расчета системы уравнений модели, потенциала и напряженности электростатического поля, электрической коагуляции. Модель позволяет рассчитывать термодинамические, микроструктурные и электрические параметры конвективных облаков на различных стадиях развития облака. Впервые при инициализации модели применено трехмерное начальное распределение полей термодинамических параметров в домене, построенное по данным глобальной модели GFS.

- С применением математического моделирования впервые исследованы новые важные аспекты механизма образования электрического заряда и поля в облаках с учетом взаимодействия термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Определены пространственное распределение и количественные значения объемных электрических зарядов и напряженности поля в облаке и вокруг него в последовательные моменты времени в процессе эволюции. Значения положительного и отрицательного объемных электрических зарядов достигают величин  $\pm 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>, напряженности поля до  $\pm 1800$  В/см и более, что согласуется с результатами измерений. Получено, что механизмы спонтанной кристаллизации крупных переохлажденных капель и роста градин за счет аккреции являются одними из ключевых физических процессов электризации на стадии роста и максимального развития грозоградовых облаков.

- Впервые реализована трехмерная численная модель конвективного облака, в которой коэффициент коагуляции частиц различных размеров изменяется в зависимости от напряженности электростатического поля облака. С помощью модели проведена количественная оценка влияния электрических процессов на формирование осадков. Для условий Северо-Кавказского региона определено, что за счет взаимного влияния друг на друга микрофизических и электрических процессов время образования осадков сокращается в мощных грозовых облаках на 20÷30 %.

- В работе теоретически подтверждена концепция о существовании положительной обратной связи между ростом частиц осадков в облаке и увеличением напряженности электростатического поля, которая заключается во взаимном влиянии их друг на друга. Анализ результатов численных экспериментов позволил установить, что электрическое поле ускоряет рост частиц в облаке, с другой стороны при этом генерируется большее количество электрического заряда, которое увеличивает само поле. Общая картина взаимного влияния проявляется в ускорении прохождения облаком стадий развития, кроме начальной, когда влияние электрических сил еще мало.

- По результатам моделирования получено, что на стадии максимального развития конвективного облака за счет электрической

коагуляции происходит наиболее интенсивный рост жидких и твердых осадков. В частности, образование градовых частиц происходит за 6-8 мин.

- Начато изучение образования и развития конвективных облаков с учетом их системных свойств. Разработаны методика и методы, проведены численные эксперименты по исследованию роли взаимодействия процессов в облаках в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. Исследовано влияние взаимодействия конвективных облаков с атмосферой, обусловленное структурой поля ветра в атмосфере, на формирование их макро- и микроструктурных характеристик. Получено, что структура поля ветра в атмосфере является существенным фактором, влияющим на формирование термогидродинамических параметров конвективных облаков. По результатам расчетов, данный фактор влияет на формирование зоны мощных восходящих потоков в облаке, на наклон данной зоны к горизонту. Существенно влияет данный фактор и на формирование полей микроструктурных параметров конвективных облаков. По результатам моделирования развития конвективных облаков с разворотом и без разворота ветра с высотой получено, что структура поля ветра в атмосфере оказывает существенное влияние на формирование области локализации водности в облаке. При этом влияние становится слабее с повышением водности в этой зоне. На положение и форму зоны повышенных значений водности влияние ветра менее выражено. По результатам расчетов, характер влияния ветра в атмосфере на формирование зоны локализации ледности в облаке примерно такой же, как на формирование области локализации водности. И в этом случае влияние ветра уменьшается с повышением значения ледности в зоне локализации ледяных частиц.

- Проводилось численное исследование формирования полей различных характеристик конвективных облаков, в частности, коэффициента турбулентной диффузии и радиолокационной отражаемости. Получено, что на стадии развития облака коэффициент турбулентной диффузии имеет наибольшие значения в верхней части облака от 100 до 400 м<sup>2</sup>/с. В стадии максимального развития облака (в предградовой и градовой стадии) радиолокационная отражаемость увеличивается до 65-75 dBZ, коэффициент турбулентной диффузии достигает 1500 м<sup>2</sup>/с и более. Водность облака достаточно неоднородна, в центральной части облака концентрация жидкой облачной воды по результатам моделирования достигает 6 г/м<sup>3</sup> и более.

- Теоретически исследовано изменение интенсивности и количества осадков из конвективных облаков теплого периода от следующих параметров: от места внесения кристаллизующего реагента, от концентрации искусственных частиц, от геометрии области засева. В результате численных экспериментов определена пространственная область в облаке, в которой внесение реагента приводит к максимальному результату по вызыванию осадков из облака. На основе обобщения результатов расчетов разработаны предложения по усовершенствованию методики засева облаков с целью усиления осадков. Наиболее оптимальной с точки зрения увеличения осадков является область внесения реагента, расположенная в зоне восходящих

потоков на уровне изотермы  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Дозировка реагента для облаков различной мощности подбирается в зависимости от термодинамического состояния атмосферы, а также от применяемых средств воздействия.

- Исследовано влияние активного воздействия кристаллизующим реагентом на формирование микроструктурных параметров градовых облаков. Источник искусственных кристаллов задавался в различных точках облака. Получено, что внесением в облако мелких искусственных кристаллов можно регулировать число образующихся в нем крупных градин в меньшую и большую сторону. Определено, что внесение частиц кристаллизующего реагента в мощных облаках на температурный уровень  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в область с большой влажностью ( $>1\text{ г/м}^3$ ) приводит к частичной или полной ликвидации жидкокапельной фракции в зоне роста крупы и градин, в результате чего образование крупного града в облаке не происходит. При этом не требуется чрезмерного расхода кристаллизующего реагента, так как используется естественная неустойчивость фазовой системы, состоящей из переохлажденных капель и кристаллов. Достаточно лишь с помощью внесения реагента дать начало механизму кристаллизации переохлажденных капель.

- Проведено исследование распространения искусственных ледяных кристаллов в облаке при активном воздействии. Характер распространения частиц показывает, что для обеспечения эффективности применения реагента требуется рассредоточивать его источники в засеваемом объеме.

- Впервые в нашей стране разработано адаптированное для исследования параметров конвективного облака программно-математическое обеспечение трехмерной визуализации расчетных данных. Программное обеспечение включает функции для детального анализа трехмерных термодинамических и микроструктурных параметров облаков в любой интересующий исследователя момент времени. Применение программы повысило эффективность физической интерпретации результатов моделирования, и дало возможность исследовать малоизученные аспекты формирования микроструктурных и электрических параметров мощных грозоградовых облаков.

- С непосредственным участием автора диссертации разработано программно-математическое обеспечение «ГИМЕТ-2010», которое предназначено для анализа и отображения данных российского доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С. Программное обеспечение отвечает современному мировому уровню, оно позволяет получать полный перечень радиолокационных, доплеровских и поляризационных продуктов. В программу отображения, также как и в зарубежных системах, встроено трехмерное представление радиолокационной информации. Комплекс программ «ГИМЕТ-2010» применяется на всей сети ДМРЛ-С Российской Федерации.

- Разработано программно-математическое обеспечение приема и комплексного анализа радиолокационной и грозопеленгационной



информации. Объединение данных с различных физических каналов позволяет определять опасные явления погоды с большей достоверностью для целей штормооповещения. Программное обеспечение применяется в радиолокационных центрах при ВГИ и в военизированных службах (Краснодарская ВС, Северо-Кавказская ВС) для формирования композитных карт опасных явлений погоды в масштабе региона.

Системы штормового предупреждения в значительной мере зависят от качества инструментальных средств наблюдений, заблаговременности и достоверности обнаружения опасных явлений погоды, от развития математических моделей и теории грозоградовых облаков в целом. Поэтому, проведенные в диссертации исследования будут способствовать более глубокому пониманию физики грозовых облаков. Реализованные на практике изложенные программы, алгоритмы, предложения повысят качество идентификации явлений погоды и эффективность технологий активных воздействий на конвективные облака.

Дальнейшие исследования на основе математического моделирования будут направлены на более глубокое изучение формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков с учетом взаимодействия физических процессов в облаках и облаков с окружающей атмосферой, а также на изучение эмерджентных свойств конвективных облаков. Также исследования будут направлены на изучение мезомасштабных систем облаков. Планируется развитие методов наукастинга опасных явлений погоды в Северо-Кавказском регионе с усвоением всех доступных видов метеорологической информации и данных мезомасштабного моделирования атмосферных процессов с учетом электричества облаков.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

#### Публикации в изданиях из баз SCOPUS и Web of Science:

1. **Shapovalov, V.A.** Propagation of Multicomponent Admixture in the Atmosphere in the Mountain-Steppe Zone, Materials Science Forum, 2018, Vol. 931, pp. 1013-1018. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.1013
2. Bychkov, A.A., **Shapovalov, V.A.** Formation of Bulk Electric Charges and Fields during Development of Thunderstorm Clouds. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 23 (2017) pp. 13142-13149.
3. **Shapovalov, V.A.**, Shapovalov, A.V., Koloskov, B.P., Kalov, R.Kh., Stasenko, V.N. Numerical Study of the Dynamic, Thermodynamic and Microstructural Parameters of Convective Clouds. Natural Science, 2018, 10, 63-69. doi: 10.4236/ns.2018.102006.
4. **Shapovalov V.A.**, Adzhieva A.A., Fedchenko L.M., Kovalev E.A. (2018). Mathematical Modeling of Formation of Transparency Regions in Supercooled Stratiform Clouds and Fogs. Journal Of Environmental Management And Tourism, V. 9, №1(25), 17-27. doi:10.14505//jemt.v9.1(25).03

5. **Shapovalov, V.A.** System of Warning about Dangerous Atmospheric Phenomena in the North Caucasus for Objects of Economic Activity, Materials Science Forum, 2018, Vol. 931, pp. 1019-1024. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.1019
6. Ashabokov, B.A., Shapovalov, A.V., Kuliev, D.D., Prodan, K.A., **Shapovalov, V.A.** Numerical simulation of thermodynamic, microstructural, and electric characteristics of convective clouds at the growth and mature stages. Radiophysics and Quantum Electronics. Volume 56, Issue 11 (2014), pp. 811-817. doi: 10.1007/s11141-014-9483-z
7. Adzhiev, A.Kh., Stasenko, V.N., Shapovalov, A.V., **Shapovalov, V.A.** Atmospheric electric field strength and thunderstorms in the North Caucasus. Russian Meteorology and Hydrology, 2016, Vol. 41, No. 3, pp. 186–192. doi: 10.3103/S1068373916030031
8. Adzhieva, A.A., **Shapovalov, V.A.**, Boldyreff, A.S. Development of thunderstorm monitoring technologies and algorithms by integration of radar, sensors and satellite images. Proc. SPIE 10424, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII, 104240H (20 October 2017); doi: 10.1117/12.2299289
9. Adzhieva, A.A., **Shapovalov, V.A.**, Mashukov, I.Kh. Local Sensing of Atmospheric Electric Field around Nalchik City. Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XIV, edited by Tuan Vo-Dinh, Robert A. Lieberman, Proc. of SPIE Vol. 10215, 102150W (May 3, 2017); doi: 10.1117/12.2279940.

**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК МОН РФ:**

10. Шаповалов, В.А. Численное исследование микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков/ **В.А. Шаповалов** // Процессы в геосредах. - 2018. - № 1 (14). - С. 804-810.
11. Шаповалов, В.А. Численное моделирование электрических процессов в грозовых облаках/ **В.А. Шаповалов** // Труды ГГО им. А.И.Воейкова, - 2018. - Вып. 558.- С. 28-36.
12. Шаповалов, В.А. Численное моделирование формирования градин в облаках при естественном развитии и активном воздействии кристаллизующим/ **В.А. Шаповалов** // Наука. Инновации. Технологии. - 2018. - Вып. 3. - С. 227-239.
13. Шаповалов, В.А. Информационная система анализа и отображения данных доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С/ **В.А. Шаповалов** // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики: Серия «Естественные и Технические науки» - 2018. - № 7. - С. 158-165.
14. Шаповалов, В.А. Методика численного решения системы уравнений трехмерной модели конвективного облака/ **В.А. Шаповалов** // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. - 2018. - № 3(23). - С. 169-179.
15. Шаповалов, В.А. Информационная технология трехмерного представления данных измерений и численного моделирования/ **В.А. Шаповалов** // Инженерный вестник Дона. -2018. -№ 2 (49). -С. 109-120. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4994>

16. Шаповалов, А.В. Моделирование электрических процессов в грозах в Северо-Кавказском регионе/ А.В. Шаповалов, Пашкевич М.Ю., В.И. Рязанов, **В.А. Шаповалов**, Березинский Н.А., Шереметьев Р.В., А.С. Камруков // Геология и геофизика Юга России. - 2017. - № 1. - С. 94-101.
17. Шаповалов, А.В. Математическая модель распространения примесей в ближней зоне при работе ракетных двигателей/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**, В.И. Рязанов// Наука. Инновации. Технологии. - 2017. - № 2. - С. 87-96.
18. Шаповалов, А.В. Моделирование спектров частиц в конвективных облаках со смешанным фазовым составом и их радиационных свойств/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**, А.Г. Езаова, К.А. Продан // Известия КБНЦ РАН. - 2013. - № 5(55).- С.63-72.
19. Ашабоков, Б.А. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития/ Б.А. Ашабоков, А.В. Шаповалов, Кулиев Д.Д., К.А. Продан, **В.А. Шаповалов** // Известия Вузов. Радиофизика. - Т. 56. - № 11-12.- 2013. - С. 900-907.
20. Ашабоков, Б.А. Исследование образования ледяной фазы в мощных конвективных облаках на основе трехмерной численной модели/ Б.А. Ашабоков, **В.А. Шаповалов**, А.Г. Езаова, М.А. Шаповалов// Естественные и технические науки. - 2014. - № 5(73). - С.78-83.
21. Аджиев, А.Х. Напряженность электрического поля атмосферы и грозовые явления на Северном Кавказе/ А.Х. Аджиев, В.Н. Стасенко, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Метеорология и гидрология. - 2016. - №3. - С. 46-54.
22. Керимов, А.М. О распространении атмосферных примесей в горно-степной зоне/ А.М. Керимов, Е.А. Корчагина, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**// Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. - 2007. - № 3 (139). - С. 86-89.
23. Бычков, А.А. Исследование на основе численного моделирования эффективности воздействия на конвективные облака льдообразующими реагентами с целью искусственного увеличения осадков/ А.А. Бычков, **В.А. Шаповалов** // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета.-2017. - № 49. - С. 65-72.
24. Аджиева, А.А. Обнаружение и распознавание опасных конвективных процессов радиотехническими средствами/ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов**, И.Х. Машуков, Скорбеж Н.Н., М.А. Шаповалов// Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. - 2014. - №1 (179). - С. 59-62
25. Шаповалов, В.А. Использование выходных данных глобальной модели атмосферы в качестве предикторов при численном моделировании облаков/ **В.А. Шаповалов** // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. - 2018. - № 52. -С. 40-48.
26. Шаповалов, В.А. Обработка данных системы гронопеленгации для уточнения распределений характеристик молнии на юге европейской

части России/ **В.А.Шаповалов**, А.А. Аджиева, Х.А. Тумгоева // Проблемы развития АПК региона. - 2018. - № 3 (35). - С. 145-150.

27. Машуков, И.Х. Алгоритмы цифровой обработки данных напряженности приземного электрического поля с использованием фильтра Калмана/ И.Х. Машуков, **В.А. Шаповалов**, А.А. Аджиева // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. - 2018. - № 3 (23). - С. 131-139.

28. Аджиева, А.А. Совершенствование прогнозирования и контроля развития опасных явлений погоды с использованием радиолокационных и грозопеленгационных методов на примере отдельного грозового очага/ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов** // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. - 2017. - № 1(193). - С. 80-88.

29. Рязанов, В.И. Трехмерная численная модель распространения примесей в атмосфере с учетом локальных метеорологических условий/ В.И. Рязанов, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Естественные и технические науки. - 2016. - № 10 (100). - С. 27-34.

30. Ашабоков, Б.А. Об одном подходе к формированию начальных условий при моделировании конвективных облаков/ Б.А. Ашабоков, А.Х. Кагермазов, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. - 2016. - № 582. - С. 159-173.

31. Аджиева, А.А. Методы обработки и представления радиолокационной метеорологической информации на территории Северного Кавказа/ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов**, И.Х. Машуков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. - 2010. - № 5. - С. 12-17.

32. Ашабоков, Б.А. Численное моделирование параметров градовых облаков при воздействии кристаллизующим реагентом. Перспективы развития полной трехмерной модели конвективного облака/ Б.А. Ашабоков, А.В. Шаповалов, З.С. Гаева, Л.Д. Новикова, **В.А. Шаповалов**, И.Х. Машуков, М.М. Шериева // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. - 2016. - № 582. - С. 174-183.

33. Аджиева, А.А. Кластерный анализ в автоматическом выявлении и сопровождении грозовых очагов по данным грозопеленгационной сети/ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов** // Инженерный вестник Дона. - 2016. - № 2 (41). - С. 28. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3559>

34. Ашабоков, Б.А. Модель конвективного облака с учетом влияния физических процессов на его характеристики/ Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, Г.В. Куповых, А.В. Шаповалов, Н.Н. Скорбеж, **В.А. Шаповалов** // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. - 2012. - № 6 (172). - С. 58-62.

35. Аджиева, А.А. Методы обнаружения и борьбы с опасными конвективными процессами на территории Северного Кавказа/ А.А. Аджиева, А.И. Рогозина, **В.А. Шаповалов**, Х.Х. Чочаев // Безопасность жизнедеятельности. - 2009. - № 56. - С. 12-15.

36. Куповых, Г.В. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков/ Г.В. Куповых, Б.А. Ашабоков, М.Н.

Бейтуганов, А.В. Шаповалов, К.А. Продан, **В.А. Шаповалов** // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. - 2012. - № 6 (172). - С. 65-68.

37. Аджиева, А.А. Использование фильтра Калмана в обработке данных хода напряженности электрического поля атмосферы/ А.А. Аджиева, И.Х. Машуков, **В.А. Шаповалов** // Инженерный вестник Дона. - 2017. - № 2 (45). - С. 87-96. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4255>

**Публикации в других изданиях:**

38. Шаповалов, В.А. Численная модель переноса и диффузии консервативной легкой примеси при заданном поле скорости ветра/ **В.А. Шаповалов** // Материалы Региональной научно-практической конференции «Проблемы информатизации общества и образования». - Нальчик, 2004. - С.52-54.

39. Корчагина, Е.А. Моделирование микрофизических процессов в облачной атмосфере/ Е.А. Корчагина, А.М. Керимов, **В.А. Шаповалов** // Известия КБНЦ РАН.- № 2(16). – 2006. - С. 50-58.

40. Ашабоков, Б.А. Трехмерная численная модель конвективного облака с учетом электрических процессов: некоторые результаты расчетов параметров грозоградовых облаков/ Б.А. Ашабоков, Федченко Л.М., А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Известия КБНЦ РАН.-2014.-№ 6(62).-С. 9-15.

41. Шаповалов, В.А. Распознавание опасных конвективных процессов с применением алгоритмов нейронных сетей (Neural Network) и компьютерного зрения (Computer Vision)/ **В.А. Шаповалов**, М.А. Шаповалов // Материалы Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. - Нальчик, 2014.- С.148-154.

42. Шаповалов, В.А. Исследование быстроразвивающихся конвективных процессов в Северо-Кавказском регионе РФ/ **В.А. Шаповалов**, М.А. Шаповалов // Сборник научных трудов Высокогорного геофизического института - Уфа, 2017. С. 23-29.

43. Шаповалов, В.А. АРМ обнаружения и предупреждения об опасных быстроразвивающихся конвективных явлениях на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов/ **В.А. Шаповалов**, И.Х. Машуков, К.А. Продан, Колычев А.Г., М.А. Шаповалов // Материалы международного симпозиума «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели». - Т.2. – Нальчик, 2013. - С.213-216.

44. Шаповалов, В.А. Некоторые результаты численного моделирования микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков/ **В.А. Шаповалов**, И.Х. Машуков, К.А. Продан, Скорбеж Н.Н., М.А. Шаповалов // Материалы Международного симпозиума «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», посвященного 20-летию КБНЦ РАН.- Т.2. - Нальчик, 2013. - С. 216-219.

45. Шаповалов, В.А. Расчет поляризационных характеристик частиц осадков с использованием данных о спектрах капель, полученных по

трехмерной модели конвективного облака/ **В.А. Шаповалов**, Созаева Л.Т., М.А. Шаповалов // Материалы Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. – Нальчик, 2014. – С.154-162.

46. Шаповалов, В.А. Влияние возмущений погоды на приземную напряженность электрического поля атмосферы/ **В.А. Шаповалов**, И.Х. Машуков, А.А. Аджиева // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «Федеральный научный центр «КБНЦ РАН» д.т.н. проф. П.М. Иванова, 16-19 мая 2017, г.Нальчик.- С. 184-186.

47. Шаповалов, В.А. Совершенствование распознавания опасных явлений погоды на основе комплексирования радиолокационной и гронопеленгационной информации/ **В.А. Шаповалов**, А.А. Аджиева // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели» Посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «Федеральный научный центр «КБНЦ РАН» д.т.н. проф. П.М. Иванова 16-19 мая 2017 С. 186-189.

48. Шаповалов, В.А. Цифровая обработка данных с применением фильтра Калмана/ **В.А. Шаповалов** // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и производства» 2017. С. 70-73.

49. Шаповалов, В.А. Исследование микроструктурных и электрических параметров конвективных облаков на основе трехмерной численной модели/ **В.А. Шаповалов** // Евразийское Научное Объединение. - 2018. - Т. 1. - № 6 (40). - С. 7-9.

50. Шаповалов, В.А. Трехмерная численная модель конвективного облака с учётом электрических процессов и электрической коагуляции/ **В.А. Шаповалов** // Сборник статей XIV Международной научно-практической конференции. «Инновационные научные исследования: теория, методология, практика», 7 мая 2018, г.Пенза. - Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». - 2018. - С.12-17.

51. Аджиева, А.А. Анализ временных рядов метеорологических параметров и их прогнозирование в мезорайоне/ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов** // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. - 2012. - № 1 (45). - С. 32-37.

52. Шаповалов, В.А. Математическое моделирование распространения примесей в ближней зоне с учетом локальных метеорологических условий/ **Шаповалов В.А.** // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том VIII М.: ИИЕТ РАН, - 2018. - С. 507-514.

53. Шаповалов, В.А. Исследование эволюции электрических параметров конвективных облаков на стадии роста и максимального развития на основе математического моделирования/ **Шаповалов В.А.** //

доклады Третьей международной научной конференции с элементами научной школы "Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата". Ставрополь, 24-28 сентября 2018. С. 142-146.

54. Шаповалов, В.А. Система объединения радиолокационной и гронопеленгационной информации для текущего прогноза опасных погодных явлений/ **Шаповалов В.А.**, Аджиева А.А. // материалы V Всероссийской конференции и школы для молодых ученых (с международным участием) «Системы обеспечения техноферной безопасности» – Таганрог: ЮФУ, 2018. - С. 304-306.

55. Shapovalov, V.A. Three-dimensional numerical model of deep convective cloud/ **Shapovalov V.A.**, Shapovalov M.A., Korchagina E.A., Skorbez N.N. // AMS 14th Conference on Atmospheric Radiation in Boston, 2014 - <https://ams.confex.com/ams/14CLOUD14ATRAD/webprogram/Paper248833.html>

56. Шаповалов, А.В. Метеорологический радиолокационный комплекс «МЕРКОМ»/ А.В. Шаповалов, А.В. Капитанников, М.В. Колосов, **В.А. Шаповалов** // Материалы XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017. – Выпуск 12. – Том 2. – С. 125-130.

57. Шаповалов, А.В. Комплексная обработка радиолокационной и гронопеленгационной информации/ А.В. Шаповалов, В.И. Рязанов, **В.А. Шаповалов**// Материалы XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017. – Выпуск 12. – Том 2. – С. 131-134.

58. Шаповалов, А.В. Трехмерная визуализация геофизической информации для решения прикладных задач/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Наука. Инновации. Технологии. - №1(5). -2014. - С. 65-73.

59. Шаповалов, А.В. Программно-аппаратные средства для оценки влияния гидрометеоров в вершинной части облаков на прохождение лазерного излучения в ИК диапазоне для авиационных и космических приложений/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**, Березинский И.Н., Пашкевич М.Ю., Березинский Н.А. // Информационное противодействие угрозам терроризма. - 2012. - № 19. - С. 125-131.

60. Шаповалов, А.В. Результаты разработки программного обеспечения трехмерного представления геофизической информации/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Материалы Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. - Нальчик, 2014.- С.100-107.

61. Шаповалов, А.В. Программное обеспечение приема и представления информации нового российского ДМРЛ-С/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**, В.О. Тапасханов, В.Н. Стасенко // Материалы Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию

Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. – Нальчик, 2014. – С.141-148.

62. Шаповалов, А.В. Результаты расчетов электрических характеристик грозоградовых облаков на основе трехмерной численной модели/ А.В. Шаповалов, В.Н. Стасенко, **В.А. Шаповалов** // Материалы II Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь»./ Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН. – Ярославль: Филигрань, 2015. – С. 61-63.

63. Шаповалов, А.В. Комплексная обработка информации метеорологических радиолокаторов и систем грозопеленгации/ А.В. Шаповалов, В.Н. Стасенко, Н.А. Кравченко, Ю.К. Лашманов, **В.А. Шаповалов**, Н.Н. Скорбеж // Сборник трудов II международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь: Издательство СКФУ, 2015. – С. 285-289.

64. Шаповалов, А.В. Исследование распространения в ближней зоне продуктов работы ракетных двигателей/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**, В.И. Рязанов // Успехи современной науки и образования. - 2017. - Том 9, - №4. - С. 201-206.

65. Машуков, И.Х. Методы дистанционного обнаружения интенсивных атмосферных вихрей с помощью доплеровских метеорологических радиолокаторов/ И.Х. Машуков, **В.А. Шаповалов**, М.А. Шаповалов, А.А. Аджиева // Известия КБНЦ РАН.- 2014. - № 6 (62).-С. 93-98.

66. Ашабоков, Б.А. Некоторые результаты численного исследования формирования термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков/ Б.А. Ашабоков, Кулиев Д.Д., К.А. Продан, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Сборник трудов VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. - Санкт-Петербург, 2012. – С.31-33.

67. Ашабоков, Б.А. Теоретические исследования механизма образования града при естественном развитии облаков и активном воздействии с целью усовершенствования метода воздействия на градовые процессы/ Б.А. Ашабоков, Федченко Л.М., А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Материалы Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. - Нальчик, 2014.- С.39-49.

68. Ашабоков, Б.А. Математическая модель градового облака с детальным расчетом электрических процессов/ Б.А. Ашабоков, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Сборник трудов II международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь: Издательство СКФУ, 2015. – С. 212-215.



69. Аджиева, А.А. Оценка степени градоопасности конвективных облаков радиолокационными методами/ А.А. Аджиева, И.Х. Машуков, **В.А. Шаповалов** // Гелиогеофизические исследования. - 2011. – Вып.90. – С.165-169.

70. Керимов, А.М. Исследование распространения атмосферных примесей для климатических условий и рельефа Кабардино-Балкарии/ А.М. Керимов, **В.А. Шаповалов**, Е.А. Корчагина // Вторая международная конференция «Моделирование устойчивого регионального развития». – Нальчик, 2007. - Т.3. – С. 47-51.

71. Корчагина, Е.А. Информационная технология оценки экологического состояния объектов промышленности и транспорта/ Е.А. Корчагина, **В.А. Шаповалов** // Материалы Региональной научно-практической конференции «Проблемы информатизации общества и образования». - Нальчик, 2004.- С. 47-48.

72. Тапасханов, В.О. Центр мониторинга опасных конвективных процессов над южным регионом Российской Федерации/ В.О. Тапасханов, А.Х. Аджиев, В.Н. Стасенко, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Материалы Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. - Нальчик, 2014.- С. 285-292.

73. Рязанов, В.И. Моделирование распространения примесей в атмосфере с учетом локальных метеорологических условий/ В.И. Рязанов, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**// Сборник трудов Высокогорного геофизического института. -Уфа, 2017.- С. 17-23.

74. Рязанов, В.И. Математическое моделирование распространения примесей в атмосфере для локальной области с учетом фактических и прогнозных полей метеорологических параметров / В.И. Рязанов, А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов**// Материалы международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики». Нальчик-Терскол. - 2017. - С. 182.

75. Корчагина, Е.А. Моделирование формирования термодинамических и микроструктурных параметров кучево-дождевых облаков с учетом электризации облачных частиц./ Е.А. Корчагина, А.А. Гажев, **В.А. Шаповалов** // Материалы второй международной конференции «Моделирование устойчивого регионального развития». - Нальчик, 2007. - Т.2. - С. 169-174.

76. Щукин, Г.Г Численное моделирование параметров конвективного облака с учетом электрических процессов./ Г.Г. Щукин, **В.А. Шаповалов** // Материалы 6-й Российской конференции по атмосферному электричеству.- Н.Новгород, 2007. – С. 124-125.

77. Аджиев, А.Х. Методика коррекции сигналов метеообъектов на дальностях свыше 100 км при радиолокационных наблюдениях./ А.Х. Аджиев, А.А. Аджиева, Х.Х. Чочаев, **В.А. Шаповалов** // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук.- 2008. - Т. 10. - №2. - С.86-93.

78. Тапасханов, В.О. Исследование структуры суперячейковых градовых процессов по радиолокационным данным./ В.О. Тапасханов, Г.Г. Щукин, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Научно-практическая конференция 50 лет ОФО ГГО. - С-Петербург, 2008. - С. 15-16.

79. Аджиева, А.А. Математическая модель конвективного облака с учетом электрических процессов и электрической коагуляции/ А.А. Аджиева, Е.А. Корчагина, **В.А. Шаповалов**, И.Х. Машуков // Межвузовский сборник научных трудов «Методы и устройства передачи и обработки информации». – М.: Издательство «Радиотехника», 2009. – Вып.11. – С. 382-386.

80. Аджиева, А.А. Математическое моделирование электрических процессов в конвективных облаках./ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов** // Материалы Международного Российско-Абхазского симпозиума «Уравнения смешанного типа и родственные проблемы анализа и информатики» и VII Школы молодых ученых «Нелокальные краевые задачи и проблемы современного анализа и информатики». – Нальчик: Эльбрус, 2009. – С.247-249.

81. Аджиева, А.А. Опасные конвективные процессы на территории Северного Кавказа./ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов**, И.Х. Машуков // Доклады участников семинара «Экологические проблемы современности». – Майкоп, 2009. – С. 9-18.

82. Шаповалов, В.А. Численное моделирование формирования макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук./ **В.А. Шаповалов** // Высокогорный геофизический институт.– Нальчик, 2011. – 128 с.

83. Машуков, И.Х. Численное моделирование формирования микроструктуры конвективных облаков./ И.Х. Машуков, К.А. Продан, **В.А. Шаповалов** // Материалы первой международной конференции «Молодежь в формировании инновационной экономики и переход к обществу знаний». – Нальчик, 2012.- С.293-298.

84. Чочаев, Х.Х. Объединение радиолокационной и грозорегистрационной информации в ЮФО и СКФО./ Х.Х. Чочаев, А.И. Рогозина, М.Н. Бейтуганов, А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов**, И.Х. Машуков, К.А. Продан // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Сборник трудов. - С.-Пб., 2012. - С.254-255.

85. Ашабоков, Б.А. Численные эксперименты по исследованию формирования микроструктурных характеристик грозоградовых облаков./ Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов, А.Г. Езаова, **В.А. Шаповалов** // Сборник материалов Международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, геологии и изменения климата». - 2013. - С. 57-60.

86. Ашабоков, Б.А. Состояние и перспективы численного моделирования облачных процессов./ Б.А. Ашабоков, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Сборник материалов Международной научной конференции с

элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, геологии и изменения климата». - 2013. - С. 11-17.

87. Шаповалов, В.А. Исследование формирования электрических характеристик конвективных облаков на основе трехмерной модели с детальной микрофизикой./ **В.А. Шаповалов**, К.А. Продан, И.Х. Машуков, М.А. Шаповалов, Н.Н. Скорбеж // Матер. конф. мол. уч. Высокогорного геофизического института, посвященной 100-летию профессора Г.К.Сулаквелидзе. – Нальчик, 2013. – С. 6-8.

88. Шаповалов, В.А. Объединение радиолокационной, грозорегистрационной и спутниковой информации для обеспечения предупреждений об опасных гидрометеорологических процессах на Северном Кавказе./ **В.А. Шаповалов**, К.А. Продан, И.Х. Машуков, А.Г. Колычев, М.А. Шаповалов // Матер. конф. мол. уч. Высокогорного геофизического института, посвященной 100-летию профессора Г.К.Сулаквелидзе. – Нальчик, 2013. – С. 19-21.

89. Аджиева, А.А. Математическое моделирование микроструктурных и электрических параметров конвективных облаков./ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов**, У.В. Тихова // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Физико-математические науки. – 2014. - №4. – С. 6-9.

90. Ашабоков, Б.А. Состояние и перспективы математического моделирования облачных процессов в ФБГУ «Высокогорный геофизический институт»./ Б.А. Ашабоков, В.О. Тапасханов, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Материалы Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. – Нальчик, 2015. – С.117-123.

91. Ашабоков, Б.А. Модель управления формированием микроструктурных характеристик градовых облаков./ Б.А. Ашабоков, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Материалы международной научно-практической конференции «Глобальные вызовы современности и проблемы устойчивого развития Юга России». – Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2015. – С. 268-273.

92. Ашабоков, Б.А. Разработка метода управления формированием микроструктуры градовых облаков./ Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Сборник трудов II международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь: Издательство СКФУ, 2015. – С. 208-211.

93. Шаповалов, А.В. Объединение радиолокационной и грозопеленгационной информации для повышения эффективности и заблаговременности обнаружения опасных явлений погоды. / А.В. Шаповалов, В.Н. Стасенко, А.Х. Аджиев, Н.А. Кравченко, Ю.К. Лашманов,

**В.А. Шаповалов** // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы Сборник научных трудов. - 2017. - С. 61-67.

94. Ашабоков, Б.А. Исследование взаимодействия облака с окружающей атмосферой на основе численного моделирования. / Б.А. Ашабоков, А.В. Шаповалов, З.Х. Гучаева, Ф.Х. Увижева, **В.А. Шаповалов** // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. - 2017. - С. 44-51.

95. Шаповалов, А.В. Численное моделирование распространения примесей с учетом метеопараметров и данных ДМРЛ. / А.В. Шаповалов, В.И. Рязанов, З.Х. Гучаева, Ф.Х. Увижева, **В.А. Шаповалов** // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. - 2017. - С. 101-108.

96. Аджиева, А.А. Локальный мониторинг напряженности приземного электрического поля атмосферы в г. Нальчике./ А.А. Аджиева, И.Х. Машуков, **В.А. Шаповалов** // Сборник научных трудов Высокотгорного геофизического института «Физика облаков и активные воздействия. Склоновые процессы. Экологические проблемы. Загрязнение окружающей среды» - Уфа, - 2017. - С. 90-96.

97. Ашабоков, Б.А. Численные эксперименты на основе трехмерной модели конвективного облака с детальным учетом электрических процессов: формирование объемных зарядов и напряженности поля./ Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Сборник научных трудов Высокотгорного геофизического института «Физика облаков и активные воздействия. Склоновые процессы. Экологические проблемы. Загрязнение окружающей среды» - Уфа, - 2017. - С. 12-17.

98. Шаповалов, А. В. Исследование взаимосвязи микрофизических и электрических процессов в конвективных облаках на основе трехмерной численной модели/ А.В.Шаповалов, **В.А. Шаповалов** // Третья Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» г. Борок 25 – 29 сентября 2017. С. 66-67.

99. Ашабоков, Б.А. Численное моделирование эволюции термодинамических и микроструктурных параметров конвективного облака/ Б.А. Ашабоков, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**, З.Х. Гучаева // Материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики». Нальчик-Терскол, ИПМА КБНЦ РАН, - 2017. - С. 38-39.

100. Аджиева, А.А. Алгоритмы распознавания опасных явлений погоды с использованием регрессионного анализа/ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов** // Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции «Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы». - 2017. - С. 312-314.

101. Аджиева, А.А. Математическое моделирование в проблеме обнаружения опасных явлений погоды/ А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов** // Материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы

прикладной математики и физики». Нальчик-Терскол, ИПМА КБНЦ РАН, - 2017. - С. 24-25.

102. Рязанов, В.И. Моделирование распространения примесей в ближней зоне при испытаниях ракетных двигателей/ В.И. Рязанов, А.В. Шаповалов, З.Х. Гучаева, Ф.Х. Увижева, **В.А. Шаповалов** // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели» Посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «Федеральный научный центр «КБНЦ РАН» д.т.н. проф. П.М. Иванова 16-19 мая 2017 С. 176-179.

103. Ашабоков, Б.А. Исследование эволюции микроструктурных параметров конвективных облаков на основе трехмерной численной модели./ Б.А. Ашабоков, А.В. Шаповалов, З.Х. Гучаева, Ф.Х. Увижева, **В.А. Шаповалов** // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели» Посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «Федеральный научный центр «КБНЦ РАН» д.т.н. проф. П.М. Иванова 16-19 мая 2017 С. 116-118.

104. Машуков, И. Х. Исследование характеристик напряженности электрического поля в приземном слое по измерениям сети датчиков EFM550/ И.Х. Машуков, А.А. Аджиева, **В.А. Шаповалов** // Третья Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» г. Борок 25 – 29 сентября 2017. С. 51-52.

105. Шаповалов, В.А. Численное моделирование переноса многокомпонентной примеси с учётом орографии местности/ **В.А. Шаповалов**, А.А. Аджиева, И.Х. Машуков // Сборник: Актуальные проблемы прикладной математики материалы IV Международной научной конференции. - 2018. - С. 278.

#### **Монографии**

106. Керимов, А.М. Модели и методы расчета мезомасштабного распространения примесей в атмосфере/ А.М. Керимов, Е.А. Корчагина, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**/. - Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2008.- 108 с.

107. Ашабоков, Б.А. Физика градовых облаков и активных воздействий на них: состояние и направления развития/ Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, В.О. Тапасханов, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**, М.К. Макуашев, А.Х. Кагермазов, Л.Т. Созаева, А.А. Ташилова, Л.А. Кешева/. – Нальчик: Издательство «Печатный двор», 2013г. - 216 с.

108. Ашабоков, Б.А. Физика облаков и активных воздействий на них/ Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов**/. – Нальчик: Издательство «Печатный двор», 2017. - 240 с.

#### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

109. Шаповалов, В.А. Программа приема, обработки и представления радиолокационной, грозорегистрационной и метеорологической информации «АПК-07-ВГИ»/ **В.А. Шаповалов**, А.В. Шаповалов/.- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.- Рег. № 2017617324 от 06.06.2018.

110. Шаповалов, В.А. Программа для сбора и передачи на центральный сервер радиолокационной информации с метеорадиолокаторов служб «АПК-11-ВГИ»/ **В.А. Шаповалов, А.В. Шаповалов**/.- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.- Рег. № 2017617324 от 06.06.2018.

111. Шаповалов, В.А. Программа для численного моделирования конвективных процессов в атмосфере «АПК-12-ВГИ»/ **В.А. Шаповалов, А.В. Шаповалов**/.- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.- Рег. № 2017617324 от 06.06.2018.

112. Шаповалов, А.В. Программное обеспечение вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-СМ «ГИМЕТ-2010»/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов, В.Н. Стасенко**/.- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. - Рег. № 2013618333 от 06.09. 2013.

113. Шаповалов, А.В. Программа численного моделирования распространения примесей в атмосфере с учетом метеорологических условий «МЗД-ДИФФ»/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов, В.И. Рязанов**/.- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.- Рег. № 2017617322 от 04.07.2017.

114. Шаповалов, А.В. Программа для приёма, анализа и отображения радиолокационной метеорологической информации радиолокаторов МРЛ-5 противорадиолокационных служб и метеообеспечения авиации «МЕРКОМ-2017»/ А.В. Шаповалов, **В.А. Шаповалов, А.В. Капитанников, З.М. Атабиев**/.- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.- Рег. № 2017617324 от 04.07.2017.

### **Личный вклад в совместных публикациях**

В работах, опубликованных в соавторстве, автору лично принадлежат следующие результаты:

- в [1, 17, 22, 29, 38, 52, 64, 70, 71, 73, 74, 95, 102, 105, 106, 113] – создание алгоритмов и программ, позволяющих вести расчеты по моделям распространения примесей при различных условиях в атмосфере, анализ данных, разработка средств визуального представления результатов;

- в [13, 56, 61, 72, 77, 109, 110, 112, 114] – разработка и реализация алгоритмов программ обработки радиолокационных наблюдений МРЛ-5 и ДМРЛ-С, создание программного кода, отладка программ;

- в [5, 7, 8, 21, 24, 26, 28, 31, 33, 35, 41-43, 47, 51, 54, 63, 65, 69, 78, 81, 84, 88, 93, 100, 101] – создание методов, алгоритмов, программ обработки, комплексирования, анализа и представления данных радиолокационных, гронопеленгационных и спутниковых наблюдений с целью идентификации опасных явлений погоды;

- в [2, 3, 6, 10-12, 14, 16, 18, 19, 20, 25, 30, 34, 36, 39, 40, 44, 45, 49, 50, 53, 55, 57, 59, 62, 66, 68, 75, 76, 79, 80, 82, 83, 85, 87, 89, 94, 97, 98, 99, 103, 111] – усовершенствование микрофизического блока модели, учет электрических

процессов, реализация численной модели облака, постановки и проведение численных экспериментов, анализ результатов;

- в [4, 23, 32, 67, 86, 90-92, 107, 108] – постановка задач и исследование результатов моделирования активного воздействия на конвективные облака, разработка предложений по усовершенствованию технологии;

- в [15, 58, 60] – разработка математических методов, алгоритмов и реализация программного обеспечения трехмерного представления геофизической информации, исследование данных расчетов и наблюдений;

- в [9, 27, 37, 46, 48, 96, 104] – разработка исследовательского программного обеспечения для анализа электрических процессов в атмосфере, обработка экспериментальных данных.

Гарнитура Таймс. Печать трафаретная. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага писчая. Усл. п. л. 2,5. Тираж 100. Заказ № 327.

