ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВЫСОКОГОРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

На правах рукописи



Шаповалов Виталий Александрович

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ, МИКРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:
доктор физико-математических наук, профессор Б.А.Ашабоков

НАЛЬЧИК - 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ……. 6
Глава 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФИЗИКИ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ …… 20
1.1 Современное состояние физики конвективных облаков и перспективы ее развития ……..... 20
1.2 Концепции развития мощных конвективных облаков 26
1.3 Влияние электрических зарядов и электрического поля на физические процессы в облаках 37
1.4 Численные модели конвективных облаков с параметризованной микрофизикой ……..... 45
1.5 Численные модели облаков с детальной микрофизикой 52
Выводы к главе ……..... 59
Глава 2. ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА С ДЕТАЛЬНЫМ УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ …… 61
2.1 Постановка задачи расчета образования и развития конвективного облака …… 61
2.2 Дискретное представление задачи ……... 74
2.3 Численные методы и алгоритмы решения системы уравнений модели ……..... 80
2.4 Трехмерная визуализация расчетных данных и радиолокационных параметров облаков ……..... 88
2.5 Результаты тестовых расчетов по проверке численных схем…… 91
Выводы к главе ……..... 97
Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ, МИКРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ ……. 98
3.1. Результаты исследований формирования полей параметров

конвективных облаков ……. 98
3.2 Результаты численного исследования микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков ……. 107
3.3. Исследование образования осадков в конвективных облаках с учетом электрических явлений ……... 128
3.4. Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений 134
3.5. Исследование влияния структуры ветра в атмосфере на формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков 140
3.5.1. Результаты расчетов конвективного облака без разворота ветра. 141
3.5.2. Исследование развития облака с разворотом горизонтального ветра с высотой ……. 157
3.6. О взаимодействии динамических, микрофизических и электрических процессов в конвективных облаках …….. 171
Выводы к главе ……. 174
Глава 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНВЕКТИВНЫЕ ОБЛАКА ……. 176
4.1 Проблема активных воздействий на облака с целью искусственного увеличения осадков ……. 176
4.2 Применение трехмерной модели для исследования вопросов искусственного увеличения осадков ……. 182
4.3 Планирование и организация работ по АВ на облака …….. 196
4.4 Критерии выбора объектов воздействия …… 198
4.5 Предложения по технологии АВ на переохлажденные облака по результатам численного моделирования …….. 201
4.6 Результаты моделирования активного воздействия на градовые облака …… 203
4.7 Исследования распространения реагента в облаках при активном воздействии 210
Выводы к главе ……. 211

Глава 5. ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ И СИСТЕМ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИИ ……... 213
5.1 Программное обеспечение обработки данных доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С ……..… 213
5.2 Программное обеспечение комплексного анализа радиолокационной, грозопеленгационной и спутниковой информации …….. 219
5.3 Методика анализа динамики конвективных процессов …… 229
5.4 Программное обеспечение трехмерного отображения радиолокационной информации …… 236
Выводы к главе ……. 243
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ……. 244
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ …… 250
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СВЕДЕНИЯ О ПРАКТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ……... 282
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДМРЛ-С «ГИМЕТ-2010» …….. 303

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВ - Активное воздействие на облака.

АМЦ - Авиационный метеорологический центр.

АРМ - Автоматизированное рабочее место.

ИУО - Искусственное увеличение осадков.

ВГИ - Высокогорный геофизический институт, г.Нальчик.

ЦАО - Центральная аэрологическая обсерватория, г.Москва.

ГГО - Главная геофизическая обсерватория им.А.И.Воейкова, г.Санкт-Петербург.

НПО «Тайфун»- Научно-производственное объединение «Тайфун», г.Обнинск.

МРЛ-5 - Двухволновый метеорологический радиолокатор производства СССР.

ДМРЛ-С - Современный доплеровский двухполяризационный метеорологический радиолокатор С- диапазона производства РФ (2011).

СКВС - Северо-Кавказская военизированная служба по активному воздействию на гидрометеорологические и другие процессы.

ПК - Персональный компьютер.

OpenGL - Графическая библиотека.

GFS - Global Forecast System - Глобальная система прогнозирования.

DirectX - это набор API, разработанных для решения задач, связанных с программированием под Microsoft Windows.

API - интерфейс прикладного программирования.

CPU - Central processing unit - центральное процессорное устройство.

GPU - Graphics processing unit - графический процессор.

CUDA - Compute Unified Device Architecture – архитектура параллельных вычислений, разработанная Nvidia для обработки графики.

MPI - Message passing interface - взаимодействие через передачу сообщений.

ВВЕДЕНИЕ

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», «НИЦ «Планета», и других организаций.

Отметим, что наряду с успехами, достигнутыми в физике облаков за последние десятилетия, многие вопросы еще остаются малоизученными. Это относится, прежде всего, к процессам в облаках с участием ледяных частиц, электричеству облаков, взаимодействию физических процессов в облаках и др. Также, анализ проектов по искусственному регулированию образования осадков в облаках показывает, что в этих работах имеется ряд нерешенных проблем, которые касаются методики проведения работ, оценки их результатов, выбора ситуаций, благоприятных для воздействия.

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, М.В.Гурович, 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 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 на градовые облака и с целью искусственного увеличения осадков.

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.

К числу наиболее сложных и значимых проблем физики облаков и активных воздействий относится разработка эффективных, научно-обоснованных методов управления процессами облако - и осадкообразования. В решении этой проблемы наряду с другими методами исследований (радиолокационными, статистическими) важную роль играет математическое моделирование облаков, которое позволяет применять в исследованиях научную методологию, специальный математический аппарат.

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.

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 математической 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 АВ на конвективные облака кристаллизующим реагентом с целью искусственного увеличения осадков (ИУО), 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, процессы осадкообразования в них при различных условиях.

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

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 большим числом градаций размеров 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 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 засеве реагентом.
- Исследована эффективность АВ на конвективные облака с целью искусственного увеличения осадков.
- Сформулированы предложения по оптимизации технологии засева льдообразующими и хладо- 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 значимость 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 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 АВ.

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, внутри- и межоблачных разрядов.

Достоверность численной модели обеспечена корректностью постановки задачи, системы уравнений, применением хорошо зарекомендовавших себя численных методов, которые успешно используются при 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 ПЭВМ 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, в том числе с данными российского ДМРЛ-С.

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; Первой международной конференции «Молодежь в формировании инновационной экономики и переход к обществу знаний», г. Нальчик, 2012; 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; Международной Российско-Китайской конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики» и Школы молодых ученых «Нелокальные краевые задачи и современные проблемы алгебры, анализа и информатики», г. Нальчик – Приэльбрусье, 2015; Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 75-летию председателя ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» Иванова П.М., г. Нальчик, 2017; 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.

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

В первой главе представлены результаты анализа современного состояния физики облаков и их численного моделирования.

Показано, что недостаточно изучены микрофизические процессы в облаках с участием ледяной фазы и электрические, имеющие место в реальных условиях облака. Мало изучено взаимодействие термодинамических и микрофизических процессов в облаках, влияние электрических зарядов частиц на происходящие в облаке микрофизические процессы и связь между электрическим полем и образованием жидких и твердых осадков.

В главе затронуты вопросы математического моделирования облачных процессов. Приводятся численные модели с параметризованной и детальной микрофизикой. Рассмотрены методы учета в моделях электрических процессов. Отмечены достоинства и недостатки существующих подходов.

Во второй главе представлена разработанная трехмерная нестационарная численная модель конвективного облака с детальным учетом электрических процессов. В модели используются уравнения гидротермодинамики облачных процессов и кинетические уравнения для функций распределения жидких и твердых облачных частиц по размерам.

Постановка задачи включает наиболее приемлемые для таких моделей уравнения, граничные и начальные условия. Для реализации модели на ЭВМ применяются современные алгоритмы, основанные на совместном применении методов расщепления и прогонки. Приведены результаты тестовых расчетов, которые показывают применимость разработанных алгоритмов и методов.

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. В качестве механизмов разделения зарядов приняты замерзание переохлажденных капель с образованием мелких заряженных осколков и аккреция капель и кристаллов.

На каждом временном шаге рассчитываются объемные заряды в облаке, потенциал электрического поля, создаваемого этими зарядами, а также

составляющие вектора напряженности электрического поля облака. Значения напряженности электрического поля учитываются при определении коэффициентов коагуляции облачных частиц.

Третья глава посвящена исследованию на основе численного моделирования процессов формирования макроструктурных, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков при естественном развитии с учетом взаимодействия физических процессов в облаках и облаков с окружающей атмосферой.

Выполнены расчеты конвективных облаков с различными исходными данными. Строение конвективного облака в различные моменты времени изучалось с применением программного обеспечения трехмерной визуализации, адаптированного для исследования физики облаков. Полученные результаты численного моделирования эволюции облаков удовлетворительно согласуются с данными наблюдений и данными других авторов.

В результате исследований были определены закономерности формирования микроструктурных и электрических параметров мощных конвективных облаков при естественном их развитии. Также определено, что важную роль в образовании осадков в мощных конвективных облаках играет взаимодействие динамических, микрофизических и электрических процессов.

В четвертой главе представлены результаты исследований активного воздействия на конвективные облака с целью регулирования осадков. В численных экспериментах варьировались: концентрация искусственных кристаллов, координаты источника в облаке, момент воздействия. На основе обобщения полученных результатов уточнены вопросы технологии воздействия, определены температурный уровень внесения реагента и его дозировки.

В главе проведено ещё исследование влияния активного воздействия кристаллизующим реагентом на формирование микроструктурных параметров

градовых облаков. Также рассмотрено распространение искусственных ледяных кристаллов в облаке при активном воздействии.

В пятой главе представлено разработанное программно-математическое обеспечение «ГИМЕТ-2010», которое предназначено для анализа и отображения данных российского доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С.

Представлено также созданное программно-математическое обеспечение объединения радиолокационной метеорологической информации, данных грозопеленгаторов, спутниковой информации. В рамках автоматизированного рабочего места разработаны усовершенствованные алгоритмы распознавания опасных явлений погоды, основанные на комплексном анализе поступающей информации с использованием математического аппарата распознавания образов. Выделяются конвективные процессы, определяются направление и скорость их перемещения. Разработаны алгоритмы экстраполяции координат очагов опасных явлений погоды по данным метеорологических радиолокаторов и грозопеленгатора.

В приложениях приведены:

- сведения о практическом использовании результатов диссертационного исследования (Приложение А);

- описание алгоритмов программно-математического обеспечения анализа и отображения данных ДМРЛ-С «ГИМЕТ-2010» (Приложение Б).

Глава 1

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФИЗИКИ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В главе приведен обзор современного состояния исследований по физике конвективных облаков и разработке их численных моделей.

Рассмотрены модели, методы и результаты моделирования термодинамических и микроструктурных параметров, механизмы электризации облачных частиц, электрические параметры, влияние электрических сил на микрофизику образования осадков, взаимодействие физических процессов в облаках.

1.1 Современное состояние физики конвективных облаков и перспективы ее развития

По результатам анализа отечественных и зарубежных публикаций состояние физики облаков и активных воздействий на них можно охарактеризовать следующим образом:

- достигнуты значительные успехи в изучении процессов, способствующих формированию микроструктурных характеристик облаков [14,36,49,67,82,87,105,152,153,181,212,217,266,276];

- достигнуты значительные успехи в развитии теории и методов исследования процессов в облаках, в развитии методов наблюдения за образованием и развитием облаков в естественных условиях и при активном воздействии [15,91,102,108,116,153,193,219,241,256];

- разработаны полные и эффективные численные модели облаков, в том числе трехмерные и нестационарные с детальным учетом процессов гидротермодинамики и микрофизики [20-31,37,42-46,50-52,60,65,66,71,73-

76,98-101,110, 137-139,160-167,172-176,183,190-192,204-208,211-218,225-227, 267,273,274];

- достигнуты определенные успехи в экспериментальных и теоретических исследованиях электричества облаков [4,33,57,62,64,68,80,92-94,113-115,152,157,162,178,185,186,200,209,221,234-236,239,242,244,247,250, 251,253,254,257-259,268,269,277-281].

- накоплен большой материал натурных наблюдений за формированием макро- и микроструктурных характеристик облаков в естественных условиях и при активном воздействии [1,2,53,72,153,169,188,220,237,246,252].

Вместе с тем, не все процессы, которые способствуют образованию частиц различных видов в облаках и формированию их микроструктурных характеристик, изучены на достаточном уровне. Как отмечено в работе [71], есть даже такие процессы, которые не до конца поняты на качественном уровне. Это относится, например, к процессам образования первичных капель и кристаллов за счет активации атмосферных ядер конденсации и сублимации, к процессам образования и роста кристаллов, электризации облачных частиц и к другим процессам. Недостаточно изучены и процессы взаимодействия частиц реагентов с облачной средой, что создает серьезные трудности на пути формализации этих процессов и моделирования активного воздействия на облака. А разработка методов воздействия на облака требует детального знания этих процессов и корректного учета их в численных моделях.

Таким образом, несмотря на успехи физики облаков и активных воздействий на них, многие вопросы, связанные с формированием макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков в естественных условиях и при активном воздействии, до настоящего времени остаются на уровне предположений и гипотез.

Характеризуя облака как объект исследования, необходимо иметь в виду, что они являются сложнейшими физическими системами и обладают всеми фундаментальными свойствами этих систем [19,27]. В связи с этим для анализа современного состояния физики облаков и активных воздействий на

них и для определения основных направлений ее развития удобнее рассматривать их как сложные системы с присущими им свойствами и с учетом методологии и методов их исследования. Такой подход позволит сформулировать направления развития физики облаков и методов исследования их образования и развития в естественных условиях и при активном воздействии.

Методология исследования систем, как известно, основана на использовании таких основополагающих методов как декомпозиция и агрегирование [19]. Декомпозиция заключается в разделении систем на части, которые затем изучаются самостоятельно.

В дальнейшем в процессе изучения систем возникает необходимость агрегирования (объединения) их частей или элементов и изучения систем в целом с учетом влияния на их функционирование внешних и внутренних факторов. Агрегирование результатов изучения элементов такой системы, как конвективное облако, можно осуществлять только с помощью их математических моделей.

При анализе этапов исследований систем необходимо иметь в виду, что независимо от их природы основной целью изучения систем можно считать установление закономерностей формирования их структуры. Очевидно, что оно требует знания основных факторов, под влиянием которых происходит формирование структуры той или иной системы, механизмов влияния различных факторов на систему, детального исследования роли различных факторов в формировании ее структуры. Как показывает анализ фундаментальных свойств систем, такими факторами можно считать взаимодействие элементов системы между собой (свойство эмерджентности) и взаимодействие системы с внешней средой (свойство иерархичности).

Отсюда с учетом, что декомпозиция систем требует использования определенного объема информации об их структуре и ей должен предшествовать этап сбора и накопления такой информации, изучение систем условно можно разделить на следующие этапы [19]:

- накопление информации о системе и установление ее структурных особенностей;

- декомпозиция системы и изучение элементов, которые образуют данную систему;

- агрегирование элементов системы и изучение роли их взаимодействия между собой и системы в целом с внешней средой в формировании ее структуры;

- изучение закономерностей функционирования системы с учетом взаимодействия ее элементов между собой и системы в целом с внешней средой.

На каждом из этих этапов в соответствии с решаемыми задачами используются соответствующие методы.

Остановимся далее на формулировке этих этапов для физики облаков. Очевидно, что методы декомпозиции и агрегирования также используются в физике облаков. Кроме этого, при анализе развития физики облаков должны быть учтены цель данного научного направления и этапы ее достижения. Сразу отметим, что основная цель фундаментальных исследований в физике облаков должна заключаться в установлении закономерностей формирования их макро- и микроструктурных характеристик. Кроме этого, как было отмечено, декомпозиция процессов в облаках на составляющие требует использования определенного объема информации о процессах, способствующих образованию и развитию облаков.

Таким образом, в случае облаков этапы их изучения можно сформулировать следующим образом:

- накопление информации об образовании и развитии облаков, установление основных факторов и физических процессов, способствующих облако - и осадкообразованию;

- декомпозиция процессов в облаках на отдельные или «элементарные» процессы с последующим их изучением;

- объединение (агрегирование) результатов предыдущих этапов, изучение роли взаимодействия процессов в облаках и облаков с атмосферой в формировании их макро- и микроструктурных характеристик;

- изучение закономерностей образования и развития облаков в целом с учетом их системных свойств.

Отметим, что третий этап можно было не выделять самостоятельно, задачи данного этапа можно рассмотреть в рамках последнего этапа. Но в силу важности рассматриваемых на данном этапе проблем для понимания закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков и в силу того, что направления исследования на этом этапе являются новыми в физике облаков, на наш взгляд, их целесообразно выделять в виде отдельного этапа исследований. Без тщательного изучения влияния взаимодействия процессов в облаках и взаимодействия облаков с атмосферой на процессы облако - и осадкообразования понять закономерности формирования их макро- и микроструктурных характеристик не представляется возможным.

Анализ отмеченных этапов развития физики облаков показывает, что в настоящее время завершается второй этап ее развития, т.е. изучение «элементарных» процессов в облаках. В настоящее время, как было отмечено, достаточно хорошо изучены и формализуются многие «элементарные» процессы, которые приводят к образованию и развитию облаков. Но остались и такие процессы, которые не изучены на достаточном уровне и плохо формализуются.

С учетом современного состояния физики облаков и активных воздействий на них можно отметить следующие направления развития данного научного направления:

- исследование «элементарных» процессов в облаках, которые остались неизученными или изученными недостаточно на прошедших этапах развития физики облаков;

- исследование роли взаимодействия процессов в облаках и облаков с окружающей атмосферой в образовании и развитии облаков;

- исследование закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков в целом с учетом их системных свойств;

- разработка научно обоснованных технологий управления процессами осадкообразования в облаках.

Очевидно, что развитие каждого их этих направлений требует решения множества проблем фундаментального и прикладного характера с использованием соответствующих методов. Отметим основные, на наш взгляд, проблемы этих направлений:

- исследование процессов образования первичных капель и кристаллов в облаках, разработка моделей этих процессов;

- исследование процессов формирования ледяной фазы в облаках в зависимости от термодинамических условий, наличия или отсутствия электрического поля, разработка моделей этих процессов;

- изучение процессов взаимодействия частиц реагентов с облачной средой в зависимости от термодинамических условий, разработка моделей этих процессов;

- исследование механизмов электризации частиц в облаках, построение их моделей;

- продолжение исследований образования и развития облаков в натурных условиях и при активном воздействии.

Таким образом, традиционные направления исследований в физике облаков (лабораторное и теоретическое исследование микрофизических процессов в облаках, исследование формирования их макро- и микроструктурных характеристик и другие) сохранятся и в дальнейшем. Но задачи этих направлений и методы исследования существенно изменятся.

К новым задачам физики облаков относятся исследования системных свойств объектов, т.е., исследования различных типов взаимодействия

физических процессов в облаках. Отметим, что такие исследования могут быть проведены только с помощью математического моделирования на основе полных трехмерных моделей облаков.

1.2 Концепции развития мощных конвективных облаков

Ниже кратко остановимся на современном уровне знаний по физике мощных конвективных облаков. В этом направлении можно отметить следующие важные работы [87,94,152,153,252].

Для образования конвективных облаков необходимо наличие неустойчивой стратификации [116]. Причиной спонтанного зарождения конвекции может служить турбулентность или неравномерный нагрев подстилающей поверхности. Конвективные облака могут возникать и вследствие динамических факторов, таких как взаимодействие воздушных потоков с подстилающей поверхностью, обтекание потоком горных хребтов, прохождение фронта (механизм вынужденной конвекции).

На размеры, водность и фазовый состав кучевых облаков сильно влияют температура и влажность в окружающем пространстве, их распределение с высотой. По представлениям автора работы [82], именно количество выделившейся теплоты является основным источником энергии, поддерживающим конвекцию значительнее, чем энергия неустойчивости атмосферы.

Верхняя граница облака обычно определяется задерживающими слоями – изотермией или инверсией. Однако бурно развивающиеся облака могут не только проникать в эти слои, но и пробивать их. В задерживающих слоях относительная влажность воздуха невелика, поэтому процесс обмена между этими слоями и облаком вносит вклад в разрушение облака.

На развитие конвекции существенно влияет турбулентность [87,153,252]. При зарождении конвекции турбулентность способствует ее развитию: вызывает рост градиента температуры в устойчивых слоях, порождает

спонтанную конвекцию. Вместе с тем, с ростом турбулентности одновременно усиливается обмен облачной массы с окружающим воздухом, поэтому влияние турбулентности довольно сложное.

Вершина кучевого облака, при достижении им высот, на которых температура окружающей среды -22 ^{0}C и ниже, постепенно оледеневает и облако превращается в кучево-дождевое (Cumulonimbus, Cb) [82,153]. Такие облака характеризуются выпадением из них крупнокапельных ливневых осадков, крупы или града. Громадные объемные электрические заряды, накапливаемые крупными Cb, могут приводить к грозовым разрядам и молниям.

Для образования Cb необходимы высокая влажность в пограничном слое, условная неустойчивость в средней тропосфере. Если при таких условиях имеется обширный (до нескольких километров в поперечнике) восходящий поток с большими вертикальными скоростями, то образуются наиболее крупные грозовые и градовые облака. Такие потоки часто обусловлены интенсивной мезомасштабной конвергенцией в нижней тропосфере, которая является причиной конвекции.

Согласно классическим представлениям, каждая из ячеек Cb проходит три стадии эволюции: стадию кучевого облака, зрелости и диссипации (распада) [153].

В первой стадии большая часть облачной ячейки занята восходящими движениями. Под нею выпадают осадки, как правило, не достигающие земли.

В стадии зрелости рядом с восходящим потоком формируется нисходящий (рисунок 1.1). Осадки становятся очень интенсивными, возможен град.

В зрелых ячейках максимальны скорости и восходящих и нисходящих вертикальных потоков, а также и возмущения в полях температуры, ветра, давления и других метеорологических параметров [87]. В верхней части зрелых ячеек формируется наковальня. Обязательным условием формирования наковальни является высокая концентрация ледяных частиц в

верхней части облака, а также достаточный запас энергии неустойчивости, большое количество выделившейся теплоты конденсации. Стадия зрелости характеризуется наличием квазистационарных промежутков в развитии облака [82].

Строение грозоградового облака в стадии максимального развития по работе [194] представлено на рисунке 1.1.

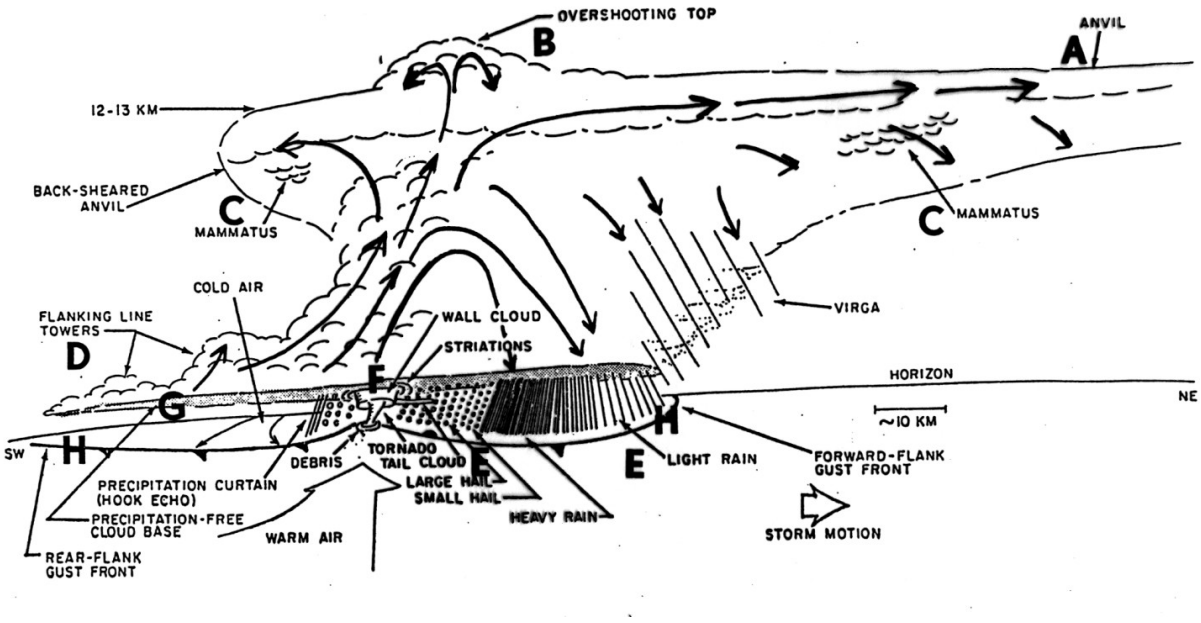


Рисунок 1.1 – Строение мощного конвективного облака [194].

В стадии диссипации в большей части ячейки воздух опускается. Осадки ослабевают, а затем прекращаются. Верхняя граница облака понижается со средней скоростью в несколько десятков сантиметров в секунду. Ледяные кристаллы испаряются и оседают очень медленно. Поэтому остатки наковален могут существовать часами.

Размеры Cb максимальны летом. Вертикальная мощность грозовых облаков может превышать 8-10 км, их вершины часто достигают тропопаузы или даже проникают в нее.

Под действием обтекания около границ облака возникает динамическое возмущение давления. Вклады динамических и термических факторов в развитие конвекции могут быть одного порядка. Облака могут расти из-за

восходящих движений, порождаемых движением облака относительно внешнего потока. В Cb возмущения поля давления обусловлены отличием температуры в облаке и за его пределами. Одним из важных следствий наличия возмущений давления в Cb является то, что верхняя половина облака становится препятствием для внешнего потока, который тормозится перед облаком и поэтому вынужден обтекать его с боков [182]. Такой эффект препятствует вовлечению воздуха через боковые границы потока и приводит к интенсификации восходящих внутриоблачных потоков. Кроме того, возмущения давления приводят к изменению профиля вертикальной составляющей скорости потока. Они увеличивают эффективную силу плавучести в верхней половине Cb, но препятствуют подъему воздуха в вершине облака. Это означает, что под действием возмущений давления уровень расположения максимальных восходящих потоков должен смещаться вниз [153].

Многие характеристики кучевых облаков и особенности их взаимодействия с окружающей атмосферой определяются вертикальными профилями ветра. Большие вертикальные сдвиги ветра мелкую конвекцию подавляют, а глубокую конвекцию, по свидетельству большинства исследователей, интенсифицируют [82]. По некоторым данным именно в этих условиях образуются особенно мощные градовые облака. Это вызывается тем, что в этом случае наклон оси Cb увеличивается и осадки начинают выпадать сбоку от облака, благодаря чему конвективный подъем воздуха внутри него не тормозится падающими частицами. Кроме того, частичное испарение осадков при таком процессе обогащает околооблачную часть атмосферы водяным паром, а значит, вовлечение меньше подавляет конвекцию.

Вопрос о связи между вероятностью выпадения града и сдвигами ветра в верхней тропосфере, мнения по которому у разных авторов противоречивые, может быть исследован теоретически. Например, в работе Пастушкова [101] показано, что характер воздействия сдвигов ветра на конвекцию зависит от

стратификации температуры и влажности, а также от их значений у поверхности земли.

Характерной особенностью Cb является то, что в их зоне наблюдаются наиболее интенсивные из встречающихся пульсации горизонтальных и вертикальных компонент скорости ветра. Наиболее интенсивная турбулентность встречается в слое на 1-2 км ниже верхней границы Cb, а также там, где соседствуют восходящий и нисходящий потоки.

Вблизи нулевой изотермы может располагаться вторичный максимум u′ и w′ [194]. Его возникновение обусловлено уменьшением устойчивости термической стратификации, происходящее здесь из-за охлаждения воздуха, вызванного таянием ледяных частиц.

Важным следствием турбулентности внутри Cb является интенсивный вертикальный обмен количеством движения. Коэффициенты турбулентности максимальны в зрелых Cb, где они могут достигать 500 $м^2/с$ и более, и минимальны в конце стадии распада облака, когда типичны значения 150 $м^2/с$.

В переохлажденной части облака становится вероятным появление ледяных кристаллов, преобладает гетерогенное образование. Инициирующим фактором являются естественные аэрозольные частицы - льдообразующие ядра (ЛОЯ) [153].

После образования зародышей льда путем сублимации или в результате замерзания переохлажденных капель начинается их диффузионный рост (равновесное давление пара надо льдом меньше, чем над водой, при той же температуре, и, следовательно, ледяной кристалл будет расти за счет диффузии пара). Перенос пара зависит от разности равновесных давлений пара над водой и надо льдом; он наиболее интенсивен при температуре −15 °C.

В качестве зародышей частиц осадков в естественных условиях могут выступать ледяные кристаллы, попадающие в переохлажденную часть облака из расположенных выше облаков верхнего яруса или из верхней части того же облака. Частицы размером более 30 мкм могут служить центрами

гравитационной коагуляции, а образовавшиеся крупные капли - зародышами градин [82,177,265].

В последние десятилетия проводятся широкие экспериментальные исследования грозовых облаков с помощью непосредственного измерения: аэрологического, альтиэлектрографического, самолетного, и дистанционных видов зондирования: радиолокационного, доплеровского, лазерного, грозопеленгационного и др.

Эволюция теории грозового облака приведена в работах Мучника В.М., Мейсона Б.Дж., Шишкина Н.С. [87,94,152] и др.

Несмотря на наличие большого числа схем строения грозовых облаков и гипотез формирования электрического поля, общепринятого взгляда на эту сложную проблему не существует и до настоящего времени.

Наибольшим признанием пользуется схема строения грозового облака, первоначально предложенная Симпсоном и Робинсоном, а затем уточнявшаяся Байерсом, Брейамом, Пирсом и др. Исследование гроз (Байерс и Брэхем) показало, что характерным образованием в них является отдельная «ячейка» и что гроза состоит из одной или более таких ячеек, находящихся на различных стадиях развития [94].

Процесс развития ячейки состоит из трех последовательных хорошо различимых стадий. На первой — «кучевой» — стадии вертикальные воздушные токи направлены повсюду вверх и облака претерпевают отчетливое вертикальное развитие. Скорости вертикальных воздушных потоков могут при этом достигать 15 м/с. На этой стадии из облака не выпадают никакие осадки, даже если процесс зарождения осадков уже начался [94].

Вторая стадия — «стадия зрелости» — начинается, когда частицы осадков вырастают до таких размеров, что начинают выпадать из облака.

Скорости восходящих воздушных потоков заметно превышают скорости, соответствующие кучевой стадии, и в центре ячейки могут достигать 30 м/с. Частицы осадков не могут падать вниз внутри таких потоков

и выпадают только в тех областях, где восходящие потоки слабее. Осадки по мере выпадения все более увлекают за собой воздух, так что наряду с восходящими потоками образуются и нисходящие токи. Именно на этой стадии происходят разряды молний и достигают максимальной интенсивности, другие грозовые явления [94].

На конечной стадии — «диссипации» — восходящие потоки воздуха исчезают, и нисходящие движения воздуха охватывают всю ячейку. Полное время жизни ячейки обычно несколько меньше 30 мин, причем за это время исчезают все эффекты, как электрические, так и другие, хотя одновременно может возрастать активность другой ячейки. Диаметр ячейки составляет величину порядка нескольких километров.

Крупномасштабное распределение объемных зарядов обусловлено влиянием различных процессов электризации, при этом ни один из них нельзя считать главным и тем более единственным в формировании электрического поля грозового облака. В облаке одновременно наблюдаются процессы, как способствующие, так и препятствующие накоплению зарядов на облачных частицах (каплях и кристаллах) и пространственному разделению значительных объемов разноименно заряженных частиц [62].

Реальная структура грозового облака является трехзарядная: основной отрицательный заряженный слой расположен между двумя положительно заряженными областями [278]. Основной слой отрицательного заряда располагается на высоте около 6 километров, а температура в нем равна примерно –15 °С. Верхняя положительно заряженная область часто достигает тропопаузы на высоте около 13 километров. На самом верху находится тонкий слой отрицательных зарядов, называемый экранирующим слоем. Его происхождение связывают с космическим излучением, ионизирующим молекулы воздуха [57]. В нижней части облака имеется вторая область положительных зарядов, меньше первой. В грозовом облаке доминируют восходящие потоки воздуха, в рассеивающемся облаке расположенные внизу

положительные заряды уносятся вниз нисходящими потоками воздуха вместе с осадками.

Вихман предпринял попытку несколько усовершенствовать теорию Финдайзена [94]. Он считает, что в центральных частях грозового облака существует узкая «труба», в которой скорость восходящих токов достигает 10÷20 м/с, а иногда и 40 м/с. В этой «трубе» зарождаются ледяные частицы, при подъеме вверх превращающиеся в крупу и град. Эти гидрометеоры выносятся из «трубы» и разносятся по облаку, которое благодаря ветру становится асимметричным. Град падает возле «трубы», создавая крупнокапельный, положительно заряженный дождь. В тыловой части облака, где падает слабый дождь, наблюдается смесь положительно и отрицательно заряженных капель. Таким образом, на основании теории Финдайзена-Вихмана получалась правильная качественная картина распределения зарядов в грозовых облаках [94]. Повторение Крамером [87] опытов Финдайзена показало, что тела в потоке заряжаются отрицательно, а не положительно. В дальнейшем появилось значительное число других экспериментальных исследований, которые подтвердили вывод, сделанный Крамером. В частности, многочисленные исследования Лезема и Мейсона [224] дали такие же результаты.

Схема Мейсона [87] предполагает, что, так как электризация, сопровождающая осаждение переохлажденных капелек на поверхности льда, имеет сравнительно большую интенсивность. Мейсон рассчитал заряды, образующиеся при росте крупы в грозовых облаках, исходя из данных наблюдений Кютнера, обнаружившего, что крупа является наиболее часто повторяющимся видом гидрометеоров в грозовых облаках. Мейсон считает, что крупа зарождается на уровне с температурой —5 °С, затем, продолжая расти, поднимается постоянным восходящим током со скоростью 10 м/с до некоторой максимальной высоты, где скорость восходящих токов сравнивается со скоростью падения крупы. При падении крупа растет в

области сухого роста, и ее электризация происходит за счет коагуляции облачных частиц до момента наступления мокрого роста.

Воркмен [280] расширил представление об эффекте заряжения градин, распространив его на случай соударения сухого града с переохлажденными каплями. При соударении сухой градины с переохлажденной каплей намерзание льда происходит в течение времени, необходимого для разбрызгивания капли и отрывания ее фрагментов от поверхности градины. Специальные эксперименты, имитирующие такой процесс, показали, что вода любого состава и концентрации, за исключением аммиачной, заряжается положительно, а лед — отрицательно. Интенсивность процессов «мокрой» и «сухой» электризации достаточна для объяснения большой скорости генерации зарядов в грозовых облаках. Кроме того, благодаря «сухому» эффекту зона генерации зарядов значительно расширяется по вертикали, до уровня изотермы -30 °С.

Процесс генерации зарядов и их распределение Воркмен представляет себе следующим образом. При падении ледяной крупы с уровня изотермы -30 °С, где уже имеются достаточно большие переохлажденные капли воды, способные разбрызгиваться при соударении с крупой, происходит «сухая» электризация [94]. Градины заряжаются отрицательно, а фрагменты капель — положительно. Зона «сухой» электризации простирается по вертикали до уровня изотермы -10 °С. В восходящих токах заряды разделяются под действием сил тяжести, вследствие чего положительные заряды поднимаются вверх, в область выше уровня изотермы — 30 °С, а градины опускаются ниже уровня изотермы -10 °С. Ниже этого уровня начинает действовать эффект «мокрой» электризации, который был описан выше.

Схема грозы Имянитова [61,62] представляет значительный интерес, так как при ее построении сделана попытка возможно полнее учесть современные представления о высокой проводимости в грозовых облаках, существование неоднородностей и т. п. И. М. Имянитов считает, что заряды в грозовых облаках образуются за счет контактного механизма электризации при

соударении частиц — жидких с жидкими, жидких с твердыми, твердых с твердыми — и при частичном срыве воды, намерзающей на поверхности твердой частицы [62]. Он указывает, что процесс образования основных зарядов в кучево-дождевых и слоистых облаках один и тот же, но только в первых не достигаются стационарные условия. Имянитовым И.М. была разработана модель развития грозового облака, основанная на современных представлениях о динамике кучево-дождевых облаков и их электрической структуре [61]. Разделение зарядов и формирование заряженных областей в грозовых облаках обусловлены действием гравитационных сил и восходящих токов. Когда капли настолько укрупняются, что скорость их падения превышает скорость восходящих токов, они перемещаются вниз, перенося с собой положительные заряды. Остающийся объемный заряд переносится восходящими токами вверх. В дальнейшем центр нижнего положительного заряда продолжает с осадками опускаться вниз, а вслед за ним опускается вниз и центр отрицательного заряда.

Схема Мучника В.М. [94] базируется на механизмах электризации при разрушении капель в электрическом поле. На основании этих исследований и современных представлений о развитии кучево-дождевых облаков им предпринимается попытка развить более полную схему образования гроз в кучево-дождевых облаках, как теплых, так и смешанного строения. Процессы образования осадков в кучево-дождевых облаках на определенной стадии развития сопровождаются возникновением сильного электрического поля, следовательно, должно существовать его влияние, как на электризацию гидрометеоров, так и на условия их роста. Значит невозможно построить теорию грозового электричества, не учитывая существования взаимной связи между ростом и электризацией гидрометеоров в кучево-дождевых облаках.

Основными механизмами электризации частиц облаков и осадков считается захват частицами аэроионов и обмен зарядами между частицами, возникающий либо после разрыва контакта между ними, либо после их разрушения (замерзания).

Наиболее сильная электризация частиц будет возникать в облаках смешанного типа, дающих интенсивные осадки. Заряды частиц будут возрастать с увеличением неоднородности физико-химических свойств частиц и возрастанием плотности и толщины облаков. В чисто кристаллических и чисто теплых облаках заряжение частиц будет происходить слабее, чем в облаках смешанного строения [94].

Разделение разноименно заряженных облачных частиц и гидрометеоров приводит к образованию в грозовых облаках электрического поля. Вследствие большой динамичности процессов в грозовых облаках распределение зарядов в них быстро видоизменяется, а вместе с тем происходит столь же быстрое изменение распределения электрического поля. Поэтому весьма существенно получение общих характеристик распределения зарядов и электрического поля в зависимости от стадии развития грозовых облаков [28].

В работе [221] обобщаются результаты исследований гроз. Приводятся схемы формирования внутриоблачных разрядов и разрядов на землю.

На рисунке 1.2 на фрагментах e и f приведены молнии в стадии диссипации шторма, для лучшего понимания приведена радарная яркая полоса (brightband) от тающих снежинок [221].

Несмотря на обилие новых приборов и методов исследования, микрофизические процессы, приводящие к зарядке грозовых облаков, остаются предметом споров.

В силу ряда причин, вершина облака заряжается положительным электричеством, а нижняя часть – отрицательным. В модели осадков, разработанной Дж.Симпсоном [265], предполагается, что когда в верхней части облака в вихре пурги ледяные кристаллы сталкиваются друг с другом, они разламываются и электризуются. Более крупные осколки заряжаются отрицательно, осаждаются в нижнюю часть облака и там тают. Также когда крупные дождевые капли у основания облака разбрызгиваются порывами ветра, то большая часть капли разряжается положительно, а сдуваемые с нее мельчайшие брызги – отрицательно. Мелкая водяная пыль, заряженная

положительно, также относится потоками воздуха вверх, а более тяжёлые отрицательно заряженные капли падают вниз облака. Также существуют другие механизмы разделения заряда облаков, которые продолжают исследоваться, и на которых здесь останавливаться не будем.

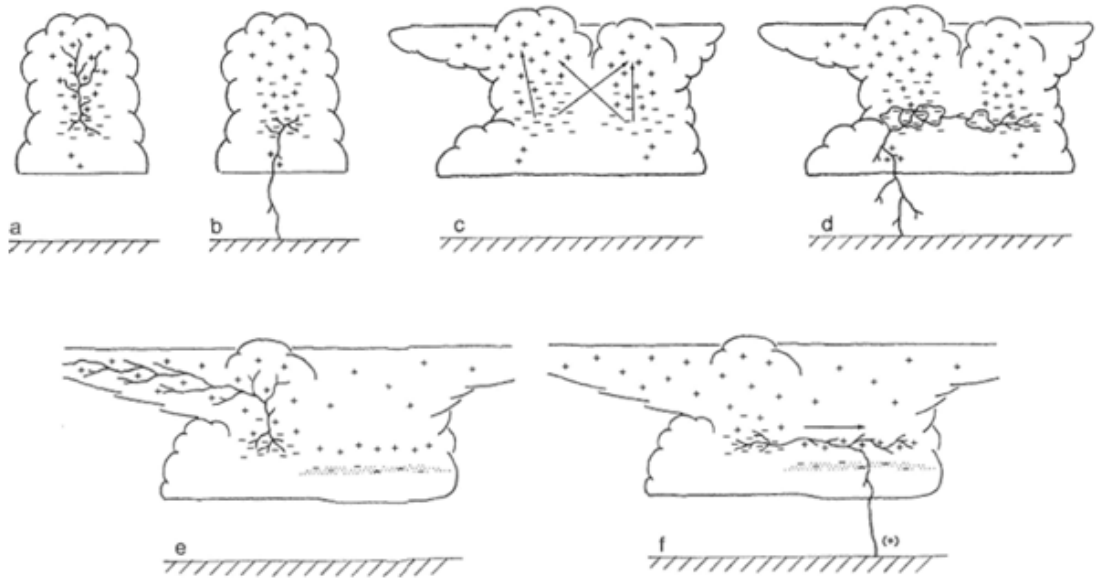


Рисунок 1.2 - Молнии в грозовом облаке (на основе различных наблюдений в разных штормах) [221].

Итак, нижняя часть облака, обращённая к земле, заряжена отрицательно, а верхняя часть - положительно. При накоплении достаточного заряда происходит электрический пробой атмосферы - молния.

1.3 Влияние электрических зарядов и электрического поля на физические процессы в облаках

Электрические поля и заряды атмосферы и облаков, а также отдельных частиц в облаках оказывают существенное влияние на элементарные процессы, происходящие в них. Электрические силы могут существенно влиять на скорость конденсации, на образования осадков в мощных кучевых облаках [62,80,87,94,152,257].

Взаимодействие частиц под влиянием электрических сил коренным образом меняет эффективность столкновения частиц, особенно мелких [77,78,103]. В очень сильных полях практически исчезает область слабой коагуляции. Под действием электрических сил процесс укрупнения частиц сводится к коагуляционному. При этом процессы столкновения, укрупнения частиц идут так, как они шли бы в облаках без действия электрических сил, но имеющих большие водности, на порядки превышающие обычные значения, т.е., электрические силы могут существенно влиять на скорость развития мощных кучевых облаков [62].

Наличие на капле заряда положительного или отрицательного знака приводит, как показывает теоретический анализ, выполненный [118], к уменьшению равновесной упругости водяного пара:

$$\ln \frac{E_{r,q}}{E} = \frac{2\sigma}{R_n \rho_к T r} - \frac{q^2}{8\pi\varepsilon r^4} \frac{1}{R_n \rho_к T} \qquad (1.1)$$

Оценка отношения E_{rq}/E по этой формуле показывает, что с влиянием зарядов необходимо считаться лишь в случае самых мелких капель (радиусом порядка 10^{-3} - 10^{-2} мкм). Имея в виду, что основной механизм образования жидкой фазы в облаках гетерогенный и размеры получаемых капель больше указанного диапазона, учитывать заряды капель на этапе конденсационного роста нет необходимости.

Когда капли несут на себе электрические заряды, на скорость их сближения, а вместе с этим и на коагуляцию оказывают влияние кулоновские силы взаимодействия, дипольные силы взаимодействия между поляризованными частицами и движение заряженных капель в электрическом поле облака.

По взаимодействию облачных частиц в электрическом поле и электрической коагуляции можно отметить следующие работы [77,78,80,81].

Для критического расстояние, в пределах которого мелкая незаряженная капля r должна приблизиться к более крупной заряженной капле R, если

столкновение происходит только благодаря электростатическим силам коэффициент эффективности столкновения $K_{эл}$ можно представить [80]

$$K_{эл} = \frac{1}{R^2}\left[\frac{45}{16\rho g}\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\frac{q^2}{R^2/r^2 - 1}\right]^{2/5}, \qquad (1.2)$$

где ρ, ε – плотность и диэлектрическая проницаемость капли, q – ее заряд. При этом рассматривалось только влияние электрических сил на эффективность соударения капель, не учитывая инерционных и вязких сил. В действительности, учет влияния этих сил на движение капель необходим.

Общее уравнение движения капельки радиусом r с зарядом q в среде, обтекающей каплю радиусом R с зарядом Q, имеет вид:

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = mg\vec{n}_z + c_x\pi r^2\frac{\rho_в\left[\vec{u}\left(\vec{l}\right) - \vec{v}\right]\cdot\left|\vec{u}\left(\vec{l}\right) - \vec{v}\right|}{2} + F_e \qquad (1.3)$$

где m – масса капельки; $\vec{v}$ - скорость капельки относительно капли; u(l) – поле скоростей воздушного потока; $\vec{l}$ - радиус-вектор из центра капли к капельке; g – ускорение силы тяжести; $\vec{n}_z$ - единичный орт по оси z; c_x – коэффициент сопротивления; $\rho_в$ – плотность воздуха; F_e - силы, действующие на капельку за счет взаимодействия зарядов q и Q и внешнего поля E_0.

Решая это уравнение при условии R>>r, Л.М. Левин [80] пришел к выводу, что выражение для коэффициента эффективности соударения капли радиуса R, несущей заряд Q, и капель радиусом r с зарядом q имеет вид

$$K_{эл} = \frac{4\alpha}{1 - \beta}, \qquad (1.4)$$

где $\alpha = \frac{Qq}{6\pi\eta rR^2V_s}$, $\beta = \left(\frac{r}{R}\right)^2$, $V_s = \frac{2\rho_к gR^2}{9\eta}$ - стоксова скорость падения, справедливо не только для стоксовского обтекания капли, но и для всех случаев ламинарного обтекания без отрыва вихрей.

Л.М. Левин также рассматривал вопрос о влиянии на величину коэффициента соударения зеркальных сил зарядов на каплях. Было получено следующее выражение для коэффициента эффективности соударения:

$$K_{эл} = \frac{4\alpha}{1-\beta}\left[1+\frac{1}{2}L(l_0)\cdot k(l_0)\right], \qquad (1.5)$$

где $L(l_0)$ – функция от некоторого характерного расстояния l_0; $k(l_0)$ – поправочный множитель. Проведенные Левиным расчеты показали, что поправочный множитель $k(l_0)$ слабо зависит от l_0 и вообще близок к единице. Кроме того, значение $1/2L(l_0)$ мало для $R<5$ мкм и составляет примерно 10 % для $R=10$ мкм. Так что учет зеркальных сил для разноименных зарядов является существенным для капель с $R>10$ мкм и со значительными зарядами.

Притягиваться друг к другу могут не только разноименно заряженные капли, но и нейтральные частицы к заряженным. При их сближении на стороне нейтральной капли, обращенной к заряженной капле, наводится заряд другого знака. Тогда между частицами возникает так называемая зеркальная сила притяжения, приближенно обратно пропорциональная кубу расстояния.

Формулу (1.5) можно использовать для определения коэффициентов эффективности соударения, когда одна из капелек не заряжена. В этом случае $К_{эл}$ отлично от нуля и приближается к единице в условиях, существующих в мощных кучевых облаках, только для капель радиусом меньше 10 мкм. Однако, с увеличением r/R и его приближением к единице значение $К_{эл}$ должно быстро возрастать, и коагуляция может иметь место и в сравнительно слабых полях.

Результат, что коэффициент захвата крупной нейтральной каплей мелких заряженных капелек достигает значительной величины в области «запрета» гравитационной коагуляции, может играть существенную роль для роста капель в этой области. Ведь большая капля, захватывая большое количество мелких капель с различными по знаку зарядами, может при этом оставаться практически нейтральной и не терять своей способности захватывать капельки с зарядами любого знака.

Электрические силы мало влияют на коэффициент соударения капель с радиусами $r>25$ мкм. Коэффициент соударения капель с $r<5$ мкм при появлении на них электрических зарядов, которые встречаются во всех видах

облаков, становится заметно отличным от нуля. Влияние электрических сил на соударения больших частиц связано с появлением электрических полей с напряженностью $E>10^4$ В/м и (или) зарядов на частицах больше 10^{-13} Кл.

При $R<10$ мкм и $q=10^{-13}$ Кл коэффициент захвата заряженных капель больше 1. При $R>10$ мкм коэффициент захвата хотя и меньше 1, но не настолько мал, чтобы с зарядом капель можно было не считаться. Роль электрического поля облака в коагуляции капель мала, если его напряженность не превышает нескольких сотен вольт на сантиметр. Однако, при напряженности поля, близкой к пробивному значению, происходит вытягивание крупных капель и их разбрызгивание [77].

Из работы [77] Красногорской Н.В., для капель сопоставимых размеров ($r/R=0,5$) следует, что совместное влияние зарядов и поля может быть весьма большим, в особенности для капель малых размеров. Для величин разноименных зарядов порядка $3\cdot10^{-17}$ - $3\cdot10^{-18}$ Кл коэффициент эффективности соударения отличен от нуля ($К=0,2$) для капель, лежащих в области, для которой гравитационная коагуляция равна нулю. Однако уже для капель, которые могут коагулировать под действием гравитационных сил ($R=20$ мкм, $К=0,132$), даже совместное влияние зарядов и поля пренебрежимо мало. Вместе с тем необходимо помнить, что с увеличением r/R и его приближением к единице значение зарядов возрастает. Так с увеличением r/R от 0,6 до 0,8 для капель с $R=10$ мкм происходит весьма заметное увеличение коэффициента эффективности соударения, хотя число сталкивающихся капель из-за уменьшения их относительной скорости падает. Результаты экспериментов, проведенных для капель близких размеров (около 65 мкм), находятся в согласии с представлениями о том, что для капель сравнимых размеров роль электрических сил значительно возрастает по сравнению с каплями сильно отличающихся размеров.

Связь зарядов капель кучевых облаков с их размерами в общем виде описывается следующей эмпирической зависимостью [78]:

$$\bar{q} = k_1 \bar{r} + k_2 \bar{r}^n \qquad (1.6)$$

Как частный случай, для симметричного распределения зарядов капель в облаках при $k_2=0$ $\bar{q} = 8 \cdot 10^{-5} r$, а при $k_1=0$ $\bar{q} = -1{,}7 \cdot r^2$.

Экспериментально установлено два типа распределения зарядов капель в облаках: симметричное и асимметричное со сдвигом в отрицательную часть спектра. Для несимметричного распределения заряда, при котором средние заряды на порядок выше, чем при симметричном, ближе соответствует выражение $\bar{q} = 8 \cdot 10^{-4} r$.

Следует иметь в виду, что измерения зарядов капель могут проводиться лишь на начальной стадии развития облака или в слабых облаках, поэтому измеренные значения зарядов ниже возможных предельных значений, определяемых из условия $q_{пр} = 100 \cdot r^2$.

Эксперименты и расчеты показали, что при симметричном распределении зарядов коэффициент захвата $K_{эл}$ для заряженных капель не превышает коэффициент захвата нейтральных капель. При несимметричном распределении заряда при $r/R \geq 0{,}4$ коэффициент захвата заряженных капель превышает свое значение для нейтральных, причем при увеличении r/R от 0,35 до 0,95 он возрастает в 100 раз. Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют заключить, что действием гравитационно-электрической коагуляции, приводящей к увеличению коэффициента столкновения капель одинаковых и сравнимых размеров, можно объяснить появление в облаке небольшого числа капель 19-20 мкм, которые в дальнейшем за счет гравитационной коагуляции вырастут до размеров дождевых.

При рассмотрении влияния электрического поля на коагуляцию капель всегда принимается во внимание только его вертикальная составляющая. Но в конвективных облаках, как известно, объемные заряды велики и горизонтальные градиенты электрического поля часто имеют тот же порядок, что и вертикальные. Исследования показали, что различие между действием

вертикального и горизонтального полей обнаруживается для E > 10^5 В/м. Значение $К_{эл}$ в горизонтальном поле может на 30 % превышать свое значение в вертикальном поле. С увеличением напряженности поля это различие растет, но вместе с тем оно уменьшается с увеличением соотношения r/R.

Скорость падения частиц должна оказывать влияние на вероятность кристаллизации, т.к. с ее ростом увеличивается вероятность захвата ядер кристаллизации. Замечено, что при больших скоростях столкновения капель электрические силы заметно не влияют на вероятность слияния. Установившаяся скорость падения заряженной капли в электрическом поле [77]:

$$u_{\infty} = \frac{d^2 \sigma g}{18\eta} - \frac{qE}{3\pi\eta d}, \qquad (1.7)$$

где d и q – диаметр капли и ее заряд соответственно, E – напряженность электрического поля.

Исследование влияния высоковольтного разряда на характеристики холодного и теплого тумана в камере проводилось в работе [103]. Диапазон изменений амплитуды высоковольтных разрядов составлял от 500 до 1000 кВ. В экспериментах проводились измерения спектров частиц тумана без воздействия и при воздействии разрядом. После воздействия наблюдаются более крупные капли (25-45 мкм), без воздействия имели размеры 8-15 мкм.

В работе Мура и Веннегута [221], основанной на данных экспериментальных наблюдений, делается вывод, что электрическая сила является основной причиной образования градовых и ливневых осадков в грозовых облаках. Авторами высказывается предположение, что разряд молний создает большое количество положительных ионов, которые заряжают облачные частицы, что в свою очередь приводит к ускорению коагуляционных процессов.

Влияние электрических сил на процессы в облаках исследовано в работе [115]. Авторами изучались особенности микроструктурных и фазовых превращений воды в облаке при разрядах разных видов методом

лабораторного моделирования и теоретических оценок. В работе отмечается, что при возникновении разрядов в облаках в области разряда концентрация ионов резко повышается, достигая значений $n = 10^{11}$ $см^{-1}$, что примерно на 6 порядков и более превышает обычно наблюдаемую в облачной среде. Столь большие концентрации ионов и резкие изменения напряженности электрического поля при разрядах неизбежно изменяют микрофизические характеристики облака. Поэтому в области разряда следует ожидать быстрого заряжения капель и формирования областей с зарядами капель, превышающими предельные, характерные для обычных условий ионообразования в облаках.

Дальнейшее сближение этих капель между собой или сближение с каплями осадков, в свою очередь, может вызвать следующий разряд между ними, что приведет к цепной реакции заряжения капель [115]. Такой процесс электризации облака может явиться одним из основных механизмов, приводящих к формированию грозового облака. При этом электрические разряды приводят не только к заряжению облака, но и резко изменяют его фазовый состав: при отрицательных температурах в области разрядов интенсивно образуются кристаллы.

Для исследования этих эффектов в лаборатории физики облаков ГГО были созданы две установки и проведен цикл экспериментов, в которых изучалось влияние электрических полей и разрядов от высоковольтного источника на температуру замерзания капель, а также на микроструктуру тумана, создаваемого в большой камере туманов [115].

В работе [35] экспериментально исследовалось взаимодействие в электрическом поле двух незаряженных капель воды, находящихся на границе раздела двух несмешивающихся жидкостей. Электрическое поле подавалось параллельно границе раздела жидкостей, и в проходящем свете производилась киносъемка процесса. Изучались несколько последовательных кадров взаимного расположения двух капель в электрическом поле с E=266 кВ/м. Радиусы капель составляют $0{,}2 \cdot 10^{-2}$ и $0{,}1 \cdot 10^{-2}$ м. После включения поля

меньшая капля деформируется к большей капле; затем вторая капля деформируется и по направлению поля от дальнего полюса отрываются мельчайшие капельки. Авторы полагают, что деформация капель объясняется усилением поля между ними.

Таким образом, анализ публикаций показывает, что при решении вопросов развития облаков и осадков необходимо учитывать электрические силы.

1.4 Численные модели конвективных облаков с параметризованной микрофизикой

Математическое моделирование играет в физике облаков важнейшую роль. Для решения различных вопросов физики облаков и активных воздействий качественные обсуждения недостаточны, необходимо оценивать количественно различные предположения, для это используют результаты расчетов на основе уравнений, выражающих физические законы.

Математические (численные) модели представляют собой мощный инструмент исследований. Простейшими из них являются модели струй, факелов, пузырей и т.д. [49]. Более совершенные модели учитывают поле ветра и микрофизические процессы. В моделях состояние атмосферы в отдельных точках пространственной сетки учитывается по ряду параметров. Минимальный набор параметров составляют физические параметры: давление, температура, вертикальная скорость, давление водяного пара и водность. В сложных трехмерных моделях таких параметров определено в каждом узле десятки и даже сотни [27,50,71,98,107,123,167,215,249].

Численные модели успешно развивались и продолжают развиваться 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 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), в том числе, модели с учетом электрических процессов.

Классификация моделей изложена, например, в работах [50,71,100,104, 217,269]. Здесь отметим лишь особенности двух видов современных трехмерных моделей, которые существенно отличаются описанием микрофизических процессов: наиболее известными являются модели с параметризованной (bulk) микрофизикой [176,183,212,240] и с детальной (bin) микрофизикой [27,71,167].

Ввиду сложности проведения расчетов, авторам моделей приходится параметризовать некоторые процессы, происходящие в облаках. В частности, в трехмерных моделях часто используют параметризованную микрофизику [212]. Достоинством таких моделей является их меньшая сложность реализации на ЭВМ и меньший объем вычислений в блоке микрофизических процессов.

Подобные модели называются моделями «суммарной воды» («bulk water» parameteresation). Микрофизический метод «суммарной воды» основан на концепции, предложенной Кесслером [212]. В работах [51,231,269] подробно описаны принципы параметризации микрофизических процессов.

Наибольшее развитие модели с параметризованной микрофизикой получили в работах [50-52,160,173,218,227,232,245,254] и др.

Параметризованная микрофизика включается в модели мезомасштабной динамики следующим образом [173,175,275]. Водные субстанции разделены на N компонентов – относительных категорий (водяной пар, облачные капли, дождевые капли, ледяные частицы, крупа града и т.д.). Для массовой концентрации (или отношения смеси) каждой компоненты m^k записывается уравнение баланса:

$$\frac{\partial \rho m^k}{\partial t} + \nabla \cdot \rho m^k V + \nabla F^k = \rho Q^k \text{, k=1..N} \qquad (1.8)$$

где V – конечная скорость падения частиц, F^k – неадвективный поток, Q^k – источник или сток k-ой компоненты.

Трехмерные модели конвективных облаков с параметризованной микрофизикой и с учетом электрических процессов представлены в работах [42,43,50-52,160,163,172,173,230-233]. Рассмотрим наиболее интересные из них на наш взгляд.

В работах [42,43,50-52] приведена трехмерная модель конвективного облака, разработанная совместно организациями Росгидромета (ГГО, ВГИ, НПО «Тайфун», ЦАО). Описание динамики производится с помощью решения полной системы уравнений Навье-Стокса, учет микрофизики – с параметризованным описанием микрофизических процессов. В модели присутствует учет ледяной фазы (трехфазное облако), процессов электризации, а также вносимых в систему возмущений (например, искусственных капель и ледяных кристаллов при АВ). Для численного решения уравнений модели используется классическая схема Мак-Кормака второго порядка точности по времени и по координате.

Гидротермодинамический блок содержит уравнения движения несущей среды, уравнение неразрывности, уравнение энергии и уравнения переноса субстанций (в том числе электрических зарядов), а также, формулу для расчета напряженности электрического поля [50].

Микрофизический блок содержит параметризованные формулы для расчета изменений количества переносимых субстанций (водяной пар, облачные капли, дождевые капли, облачные ледяные кристаллы, ледяные частицы осадков, электрические заряды) вследствие фазовых переходов, коагуляции облачных элементов и процессов их заряжения [43].

В работе учтены следующие основные механизмы электризации:

1. Диффузионный – заряжение облачных капель (ОК), облачных ледяных кристаллов (ОЛК), дождевых капель (ДК) и ледяных частиц осадков (ЛЧО) вследствие диффузии к этим частицам атмосферных ионов и последующего их захвата.

2. Индукционный – заряжение ОК, ОЛК, ДК и ЛЧО при селективном захвате атмосферных ионов указанными частицами, поляризованными во внешнем электрическом поле.

3. Сложение зарядов взаимодействующих частиц разных типов при их коагуляции.

4. Изменение количества заряда, переносимого частицами того или иного сорта, при их взаимных превращениях в процессе фазовых переходов.

5. Разделение заряда при упругом взаимодействии ДК и ОК, поляризованных во внешнем электрическом поле.

6. Разделение заряда при упругом взаимодействии ЛЧО и ОЛК.

С помощью модели авторами [43] исследовано формирование микроструктурных параметров конвективных облаков при естественном развитии и при активном воздействии на них гигроскопическими и кристаллизующими реагентами, исследованы электрические характеристики облака. Разработанная модель соответствует мировому уровню.

В работе [160] на базе модели RAMS исследовались особенности гроз на побережье Израиля, сопровождающихся интенсивными осадками и мощной электрической активностью. Для этого в модель с параметризованной микрофизикой был встроен блок электрических процессов, учитывающий контактные механизмы электризации, формализованные по результатам лабораторных экспериментов Саундерса [257] и Такахаши [270]. Результатами численных экспериментов являлись объемные распределения зарядов в облаке, при этом получались как трехполюсные структуры, так и диполи.

Трехмерная негидростатическая мезомасштабная модель (MésoNH) [163] использует оригинальную микрофизическую схему смешанной фазы для параметризации процессов электризации в облаках. Электрические заряды, переносятся каждой из пяти категорий гидрометеоров, а их перераспределение зависит от размера частиц. Электрическое поле моделируется на каждом временном шаге после интегрирования электрического потенциала, индуцированного объемным электрическим зарядом, по уравнению Пуассона.

Молниевый разряд срабатывает, когда электрическое поле превосходит заданный порог, при этом он распространяется в двух противоположных направлениях до тех пор, пока величина электрического поля не упадет ниже заданного значения. Затем активируется алгоритм фрактального ветвления, чтобы расширить стримеры молнии от основного канала и в сторону облачных областей, где присутствуют значительные плотности заряда. Заряды нейтрализуются вдоль извилистого пути молнии с помощью процедуры, которая сохраняет общее количество заряда [164,249]. Полученная схема электризации, была протестирована для идеального случая суперячейкового шторма, при этом она показала интенсивную электрическую активность на протяжении всего жизненного цикла облака.

Работа [184] описывает одну из последних реализаций физики молнии в рамках исследования погоды в модели прогнозирования WRF. Чтобы обеспечить научно обоснованную оценку возникновения молнии, использовалась явная модель заряда/разряда (с явным эллиптическим решением трехмерной составляющей окружающего электрического поля), для этого разработан алгоритм, внедренный в параметризованную микрофизику, которая основана на двухмоментной схеме. Заряжение гидрометеоров состоит из пяти различных неиндуктивных параметризаций, поляризации облачной воды и обмена зарядами во время контактного массообмена [186]. Эта модель молний была протестирована с помощью эталонного моделирования для трех различающихся конвективных систем: континентального шквала, крупного урагана и зимней бури. Численные эксперименты для всех трех случаев показали в целом хорошее качественное согласие. Позже физика разряда молнии в этой модели была обновлена, а в исходный код внесена хорошо документированная гибридная трехмерная схема, позволяющая прогнозировать тип вспышки и полярность [228].

В моделях [230-233] применяются одномоментная и двухмоментная схемы параметризованной микрофизики с множественными категориями ледяных частиц осадков. Она имеет 2 категории жидких частиц (облачные

капли и дождь) и 10 категорий для ледяных частиц, которые характеризуются формой, размером и плотностью. Среди которых три категории крупы с различной плотностью и диаметром. Концепция электризации через контакт реализуется для столкновений между категориями крупы и облачными ледяными кристаллами. Множественные категории льда позволяют учитывать ряд плотностей и скоростей падения частиц для моделирования различных конвективных процессов с минимальной настройкой параметров. Схема применялась к двум случаям: идеализированная континентальная многоячейковая буря, дающая ледяные осадки, и небольшой морской шторм во Флориде, в котором важно то, что имел место теплый дождь. Модель воспроизводит основную эволюцию молнии от низких и средних уровней к верхним уровням. Коэффициент коагуляции играет большую роль в схеме для сопоставимости начального роста ледяных кристаллов, скорости разделения заряда и накопления осадков.

Некоторые авторы адаптируют уже имеющиеся у них модели конвективных облаков для изучения их электризации. В работе [254] электризация облака исследовалась при помощи трехмерной негидростатической модели в координатах (x,y,p) с параметризованной микрофизикой. Электрические процессы в данной модели ограничены ледяной фазой. Только взаимодействие между градинами и ледяными частицами приводит к разделению зарядов. Микрофизические процессы не подвержены влиянию локального электрического поля, за исключением процесса седиментации.

Подавляющее большинство исследований электризации грозового облака с помощью численного моделирования (как двумерных, так и трехмерных) использовали параметризованную микрофизику для представления облака и частиц осадков [172,173]. Часто возникающий вопрос при этом заключается в том, что насколько хорошо они могут имитировать явные выражения физики облака в сравнении со значительно более требовательными к машинному времени детальными моделями, и более того,

именно в области электризации, которая критически зависит от взаимодействия ледяных частиц.

Модели с параметризованной микрофизикой дадут немало полезной информации при условии, что параметризацию микрофизических процессов в облаках можно осуществить достаточно корректно. Но с учетом многообразия и сложности этих процессов, с учетом прямых и обратных связей между микрофизическими процессами, а также между макро- и микрофизическими процессами такая параметризация может быть корректной лишь в окрестности уже известных состояний облака или на небольших отрезках времени его развития. Иными словами, модели облаков с параметризованной микрофизикой не пригодны для исследования долговременной эволюции облаков. Особенно ограниченными возможности таких моделей являются для моделирования активного воздействия на конвективные облака. По мнению специалистов ВГИ, модели с параметризованной микрофизикой мало подходят для этой цели [27], т.к. активное воздействие, как правило, осуществляется с помощью диспергированного реагента и предполагает управление микрофизическими процессами, которые в модели параметризованы. Важно отметить, что при моделировании активного воздействия на основе моделей с параметризованной микрофизикой также будут получены изменения естественного развития облаков. Но на вопросы, с чем будут связаны эти изменения и будут ли они соответствовать реакции реального облака на воздействие, такие модели ответить не в состоянии.

С учетом, что любое упрощение модели сужает круг задач, для решения которых ее можно использовать, преимущества моделей с детальным учетом микрофизических процессов становятся очевидными. Они стали бы еще более очевидными при наличии эффективных методов и средств проведения вычислительных работ. Поэтому другим направлением развития численных моделей конвективных облаков является разработка моделей с детальным описанием микрофизических процессов.

1.5 Численные модели облаков с детальной микрофизикой

Несмотря на распространенность, подход с параметризованной микрофизикой часто не достаточен для описания реального поведения спектра частиц, особенно при наличии ледяной фазы. Более того, облачные частицы, в отличие от подхода «суммарной воды», действуют не линейно [49,71,153].

Численные модели с детальной микрофизикой развиты в следующих работах в нашей стране [19,27,36,40,55,71,73-75,112,137-139,162], за рубежом [166,167,187,204,205,213-217,225,229,243,248].

Модели с детальной (bin) микрофизикой учитывают спектр облачных частиц, они описывают эволюцию спектра согласно физическим законам [71]. Такие модели включают кинетические уравнения для распределения облачных частиц по размерам $f(r)$ или массам $f(m)$. Спектр частиц разбивают на множество (несколько десятков) интервалов масс (размеров). Все частицы одного размера имеют одинаковые физические и химические свойства.

Для сравнения отметим, что микроструктурные параметры в bulk моделях [50,231] описываются 5-15 переменными, а в bin моделях – многими десятками (например, 137 классов частиц в работе [27]).

Трехмерные модели с детальным учетом термодинамических и микрофизических процессов для глубокой конвекции до настоящего времени в меньшей степени применялись из-за сложностей реализации, большого времени счета и требуемых вычислительных ресурсов. Кроме того, обучение молодых специалистов в университетах и научных центрах США проводится на свободно распространяемых исходных кодах моделей с параметризованной микрофизикой [160,176,238], что способствовало большей популяризации и распространению bulk моделей.

Остановимся на трехмерных нестационарных моделях с детальным учетом процессов гидротермодинамики и микрофизики. Отметим, что такая модель для теплого конвективного облака впервые была предложена в работе [71]. В работе на основе этой модели проведены исследования роли

турбулентного переноса облачных частиц в формировании микроструктуры облаков и осадков.

Появление этих работ можно считать началом создания трехмерных нестационарных моделей облаков (в том числе и градовых), описывающих гидротермодинамические и микрофизические процессы детально.

Наиболее подробно подход с детальным описанием микрофизических процессов приведен в монографии [71].

Трехмерная нестационарная модель градовых облаков с детальным учетом процессов гидротермодинамики и микрофизики предложена в работе [27]. Для описания динамических процессов в модели использованы уравнения глубокой конвекции в приближении Буссинеска, а микрофизические процессы описываются с помощью системы кинетических уравнений для капель и градовых частиц. Для проведения вычислительных работ используется алгоритм, основанный на комбинации методов расщепления и Бубнова-Галеркина. Использование этого алгоритма основано на его относительной экономичности. В этих работах приведены некоторые результаты модельных расчетов. Основной результат этих расчетов, на наш взгляд, заключается в том, что показана возможность проведения исследований образования и развития градовых облаков с помощью таких сложных моделей.

В дальнейшем данная модель была усовершенствована путем добавления в нее процессов, описывающих электризацию частиц различных видов в облаках [23]. Эти модели использовалась для моделирования образования и развития градовых процессов, а также активного воздействия на них путем внесения искусственных льдообразующих частиц.

В растущих облаках условия обычно таковы, что средний рост облачных капель с радиусом более 60-80 мкм целиком определяется процессом гравитационной коагуляции, тогда как конденсационным ростом можно пренебречь. Коагуляционный рост жидких и твердых частиц описывается интегро-дифференциальным уравнением [22,26,167]:

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{КГ} = -f_1(\vec{r},m,t)\int_0^{\infty} K_{11}(m,m')\cdot f_1(\vec{r},m',t)dm' + \\ + \int_0^{m/2} f_1(\vec{r},m-m',t)K_{11}(m,m-m')f_1(\vec{r},m',t)dm' \\ - f_1(\vec{r},m,t)\int_0^{\infty} K_{12}(m,m')\cdot f_2(\vec{r},m',t)dm' \tag{1.15}$$

в котором $f_1(\vec{r},m,t)$ и $f_2(\vec{r},m,t)$ – функции распределения облачных частиц по массам, $K_{11}(m,m')$ и $K_{12}(m,m')$ – ядро уравнения коагуляции и аккреции, соответственно.

Одним из популярных методов численного интегрирования уравнения коагуляции является метод, предложенный Берри и Рейнхардтом [167]. Непрерывный спектр облачных частиц заменяют дискретным. Используются преобразования переменной $m = m_0 \exp[3(I-1)/I_0]$, $I_0 = 6/\ln 2$ и функции распределения $G(I)dI = mf(m)dm$. Значения функции *G(I)* в узлах сетки рассчитываются точно. Но для вычисления второго интеграла в (1.15) необходимо знать значения функции в промежутке между узлами. Эти значения разные авторы получают с применением различных процедур интерполяции значений функции в близлежащих узлах. Этот метод не обеспечивает сохранение физических моментов распределения (общей массы капель M, счетной концентрации N, радиолокационной отражаемости Z), которые являются интегральными характеристиками непрерывных спектров и не определены для дискретных. Тем не менее, расчеты показали, что изменение массы системы за счет погрешности счета, которого не должно быть реально при коагуляции, составляет не более доли процента в сложных для расчета случаях [71]. Важным достоинством метода является то, что нет необходимости параметризовать функцию распределения.

Большинство численных моделей включают спонтанное дробление как единственный механизм фрагментации капель. В работе [255] авторы, опираясь на лабораторные эксперименты, полагают, что основной механизм

дробления капель – разрушение при столкновениях. Поэтому в таких моделях решают совместное уравнение коагуляции-дробления.

В последнее время делают попытки учесть в моделях облаков химическую природу ядер конденсации, что имеет значение для расчета спектра капель, формирующегося на этапе конденсации. В работе [269] категории облачных частиц описываются одновременно и независимо, согласно их физическим и химическим свойствам. Чтобы описать облачные капли, дополнительно к обычной компоненте m_w (масса водной частицы) используют компоненту m_s (масса растворимой части ядра) для одного основного раствора (обычно сульфата). Тот же подход использован и для ледяных частиц. Для них дополнительно подключают фактор формы (аксиальное отношение сфероида). Использовали 45 категорий для облачных частиц, 20 для растворенного вещества, 11 для фактора формы.

Свойства ледяных частиц особенно сложны, т.к. частицы с одинаковыми массами могут иметь разные размеры и форму. Традиционные модели с детальной микрофизикой не в состоянии учесть сложные формы ледяных частиц и скорости их роста, которые зависят от микрофизических процессов в облаке и химического состава. Ни одна из моделей не может описать изменение формы кристалла из-за процессов осаждения пара, заиндевения, агрегации при различных условиях в облаке.

При описании формирования спектров ледяных частиц уравнение баланса для льдообразующих ядер не решают, а используют распределение по Флетчеру:

$$N_n(\Delta T) = N_0 \exp(\beta \Delta T), \qquad (1.18)$$

где $\Delta T = T_0 - T$ – переохлаждение, T_0=273,15 К, β - параметр, значения которого лежат между 0,4 и 0,8. Параметр N_0 может меняться на несколько порядков, его типичное значение 10^{-5} $л^{-1}$.

Используя функцию распределения льдообразующих ядер по переохлаждениям (1.18) в работе [71] варьируют скорость зародышеобразования, изменяя значение N_0. Для β принято значение

0,58 град.$^{-1}$. Авторы приходят к выводу, что микро- и макроструктура облаков сильно зависит от скорости образования льда.

Рост кристаллов изучен в гораздо меньшей степени, чем рост облачных капель. Причина кроется в сложности форм кристаллов и сложности процессов, протекающих на границе раздела лед – водяной пар. Для скорости сублимационного роста кристаллов пластинчатых форм в работе [71] предложена формула, основанная на интерполяции экспериментальных данных:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D\rho_a \Delta}{\Gamma_2} \frac{1+\mu r}{\nu r}, \qquad (1.19)$$

где D – коэффициент диффузии водяного пара, Γ_2 – коэффициент, учитывающий отличие температуры кристалла от температуры паровоздушной смеси, r – радиус кристалла, Δ - пересыщение надо льдом, $\mu = 0{,}2\ 10^{-3}$ см$^{-1}$, $\nu = 0{,}5$ г/см^3.

При моделировании электрических процессов в облаках считается, что процессы микроэлектризации протекают при взаимодействии градовых и облачных частиц. В начальный момент времени заряды в облаке отсутствуют, и электрическое поле постоянно и равно полю хорошей погоды.

В работе [282] нестационарная численная модель используется для имитации роста электрического поля в грозовых облаках механизмом поляризации, в том числе как за счет роста гидрометеоров и рост электрического заряда центров. Результаты демонстрируют прямую связь между ростом гидрометеоров и электрического поля. Анализируются различные типы облаков, с учетом их электрических свойств. Установлено, что облака, содержащие крупные частицы льда и мелкие переохлажденные капельки воды, и полностью закристаллизовавшиеся облака создают электрические поля, достаточные для возникновения молнии. Электрические силы в облаках замедляют скорость падения частиц осадков и уменьшают скорости их взаимодействия. Таким образом, результирующим эффектом

является замедление роста гидрометеоров и скорости нарастания электрического поля.

Остановимся на моделях с детальной микрофизикой и учетом электрических процессов, которых пока еще очень мало.

В работе [215] рассматривается метод ускорения коагуляционного роста капель с целью увеличения осадков и создания зон просветления в туманах. Подход предполагает, что некоторая часть капель облаков (или тумана) заряжается. Для проверки эффективности метода разработана численная модель, позволяющая моделировать эволюцию спектра капель при столкновениях. Моделирование эволюции спектров капель включает в себя несколько этапов: силы, возникающие между заряженными и нейтральными каплями, а также между заряженными каплями, вычисляются как функция значения зарядов, размера капель и расстояния между каплями [215]. Показано, что из-за индукционного эффекта, между заряженными и нейтральными каплями возникают значительные силы притяжения. Результаты используются для расчета эффективности столкновений между заряженными и нейтральными, а также между заряженными каплями. В результате получается «четырехмерная» таблица эффективности столкновений (эффективность столкновений рассчитана как функция размера капли и заряда). Эффективности столкновений между заряженными и нейтральными каплями оказывается значительно выше, чем чисто в гравитационной коагуляции. В работе также представлен метод решения стохастического уравнения коагуляции. Капли описаны двумерной функцией распределения по размеру, в которой капельки характеризуют их масса и заряд. Эта модель, с реализованной таблицей эффективностей столкновения, используется для моделирования эволюции спектров капель в облаках и тумане, если некоторая часть этих капель заряжена.

Проведено моделирование эффектов засева заряженными капельками. Были выполнены численные эксперименты по моделированию эволюции изначально узкого спектра размеров капель в случае активных воздействий и в

естественных условиях, показано, что хотя естественный спектр капель не дает никаких капель дождя, внесение даже небольшой доли заряженных частиц интенсифицирует процесс столкновения и приводит к образованию дождевых капель уже через несколько минут после внесения [215]. Значительное ускорение образование дождевых капель было обнаружено в случае морского широкого спектра капель. Моделирование засева тумана проводили с использованием распределений спектров капель типичного тумана. Засев заряженными каплями тумана был смоделирован одной или двух полярностей. В обоих случаях было обнаружено значительное увеличение видимости тумана.

В ВГИ разработана трехмерная численная модель конвективного облака с учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов [23,26], при этом используются уравнения с детальной микрофизикой. В модели учитываются: электризация частиц, накопление зарядов в облаке, напряженность электрического поля, электрическая коагуляция облачных частиц. Разработана методика формирования трехмерных начальных данных по термодинамическому состояния тропосферы, которые используются для инициализации модели [18].

Система уравнений модели решается методами расщепления по физическим процессам и покомпонентного расщепления. Использованы неявные схемы второго порядка точности по времени и координатам. Результаты тестирования и проверок модели продемонстрировали высокую точность реализованных численных методов и алгоритмов расчетов [23,125,131,145,261].

Модель позволяет исследовать формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков, процессы осадкообразования в облаках, электризацию частиц и другие процессы. Для описания микрофизических процессов в модели используются кинетические уравнения для функций распределения частиц различных видов по массам. При этом охватывается широкий спектр размеров частиц – от микронных размеров, до

миллиметровых капель и сантиметровых градин. Для сопоставления результатов расчетов с данными наблюдений (с данными метеорологических радиолокаторов), кроме других параметров, рассчитывается радиолокационная отражаемость облака на длинах волн 3.2, 5 и 10 см.

Отметим, что исследования по усовершенствованию данной модели в ВГИ ведутся постоянно. В последние годы они проводилось в направлении усовершенствования учета в модели электрических процессов и в направлении разработки нового метода формирования входных данных (начальных условий для системы уравнений модели). Разработан новый метод формирования входных данных (начальных значений) численных моделей конвективных облаков, основанный на использовании выходной информации глобальной системы прогноза GFS. Исследованы возможности использования метода для численного моделирования образования и развития градовых облаков. Кроме этого модель используется для проведения исследований формирования макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков в естественных условиях и при активном воздействии [20-22,128-130].

Выводы к главе

Трехмерные модели, как инструмент исследования мощных конвективных облаков, получили к настоящему времени достаточное развитие. Существует два направления по описанию микрофизических процессов: трехмерные модели с параметризованной микрофизикой и трехмерные модели с детальной микрофизикой. Оба направления актуальны и позволяют достаточно адекватно имитировать развитие мощных конвективных облаков. Для исследования физики облаков и активных воздействий более эффективно использование моделей с детальной (спектральной) микрофизикой. В настоящее время начался заметный переход к моделям со спектральной микрофизикой. Электрические процессы все чаще включаются в трехмерные модели облаков, большинство из них - с

параметризованной микрофизикой. Моделей с детальной микрофизикой и учетом электрических процессов пока еще мало.

Существует большое разнообразие механизмов электризации облачных частиц, пока по ним нет согласованного мнения.

Важную роль в формировании микроструктуры конвективных облаков играет взаимодействие динамических, термодинамических и микрофизических процессов. В настоящее время в некоторой степени изучено взаимодействие динамических и термодинамических процессов в облаке. Но другие виды взаимодействия процессов, например, электрических и микрофизических, мало исследованы. В существующих в настоящее время моделях облаков с учетом электризации недостаточно учитывается влияние электрических характеристик облака на микрофизические процессы.

Проблемы усовершенствования существующих и разработки научно-обоснованных методов активного воздействия на облака требуют глубокого изучения закономерностей формирования их микроструктурных характеристик при естественном развитии и активном воздействии. Их понимание на качественном уровне уже недостаточно, необходимы глубокое знание этих процессов и умение описывать их количественно.

Проведенный анализ состояния трехмерных моделей конвективных облаков позволил определить цель диссертационной работы: применить математическое моделирование для исследования: электрических процессов в мощных конвективных облаках, взаимодействия физических процессов, вопросов осадкообразования и активных воздействий с целью искусственного увеличения осадков и изменения микроструктурных характеристик мощных облаков.

Глава 2

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА С ДЕТАЛЬНЫМ УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В главе представлена разработанная в ВГИ трехмерная модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Приведены уравнения модели, начальные и граничные условия, а также алгоритмы проведения расчетов, основанные на конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений в частных производных и методов расщепления по физическим процессам и прогонки.

2.1 Постановка задачи расчета образования и развития конвективного облака

Для разработки модели использовались уравнения, применяемые при численном моделировании конвективных облаков, в частности, в работах [17, 27,50,71,269]. Математические проблемы, связанные с численным моделированием атмосферных процессов и облаков, обсуждаются в работах [83,276]. Ниже кратко остановимся на разработанной модели.

При описании процессов в облаках будем использовать следующие обозначения: $u(\vec{r},t)$, $v(\vec{r},t)$, $w(\vec{r},t)$ - компоненты вектора скорости воздушных потоков в облаке; $\vec{V}=\{u,v,w\}$ - вектор скорости; $\vec{n}_z$ - орт оси z; $\theta(\vec{r},t)$ - потенциальная температура; $\pi(\vec{r},t)=c_p\bar{\theta}(P(\vec{r},t)/1000)^{R/C_p}$ - безразмерное давление; $\bar{\theta}$ - средняя потенциальная температура; R - газовая постоянная; $s(\vec{r},t)$ - удельная влажность воздуха; $Q_S(\vec{r},t)$ - суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке; $\sigma(z)$ - параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой; $P(\vec{r},t)$ и $T(\vec{r})$ - соответственно давление и

температура; C_p - теплоемкость воздуха при постоянном давлении; $L_K, L_C, L_З$ - 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; $\frac{\delta M_З}{\delta t}$ - масса капельной воды, замерзающей в единицу времени в единице объема воздуха; $K(\vec{r},t)$- коэффициент турбулентной диффузии; $V_1(m)$, $V_2(m)$ - установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц; $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{КД}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{КГ}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{АК}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{ДР}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_З$ - изменения функции распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно; $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_C$, $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{АК}$, $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_З$ - изменения функции распределения кристаллов за счет сублимации, аккреции и замерзания капель; $\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_З$, $\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{АК}$ - 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; $I_{АВ}$ – источник искусственных кристаллов при активном воздействии кристаллизующими реагентами; $\rho_-(\vec{r},t), \rho_+(\vec{r},t), \rho_Э(\vec{r},t)$ - соответственно отрицательный, положительный и суммарный объемные заряды; ε_0 - диэлектрическая постоянная вакуума; a_2 и a_3 – коэффициенты разделения зарядов; $\rho_2(\vec{r},t)$ и $\rho_3(\vec{r},t)$ – уменьшение объемных зарядов в результате тока проводимости атмосферы и разрядов;

$U(\vec{r},t)$, $E(\vec{r},t)$ - потенциал и напряженность электростатического поля облака;

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

В трехмерном случае введенные переменные зависят от трех пространственных координат - расстояния по горизонтали (x,y) и высоты (z), при этом, $\vec{r}$ соответствует координатам (x,y,z). Для границ пространственной области используются обозначения $0, L_x$, $0, L_y$ и $0, L_z$.

Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнения движения, описывающего влажную конвекцию в приближении Буссинеска, в котором учитывают адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов [71].

Микрофизический блок описывает процессы нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками.

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

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial u}{\partial t}+(\vec{V}\cdot\nabla)u=-\nabla\pi'+\Delta' u+lv,\\
&\frac{\partial v}{\partial t}+(\vec{V}\cdot\nabla)v=-\nabla\pi'+\Delta' v-lu,\\
&\frac{\partial w}{\partial t}+(\vec{V}\cdot\nabla)w=-\nabla\pi'+\Delta' w+g\left(\frac{\theta'}{\theta_0}+0{,}61s'-Q_S\right),
\end{aligned}\qquad (2.1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=\sigma w, \tag{2.2}$$

уравнения термодинамики

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}+\left(\vec{V}\cdot\nabla\right)\theta=\frac{L_k}{C_p}\frac{\theta}{T}\frac{\delta M_K}{\delta t}+\frac{L_C}{C_p}\frac{\theta}{T}\frac{\delta M_C}{\delta t}+\frac{L_3}{C_p}\frac{\theta}{T}\frac{\delta M_3}{\delta t}+\Delta'\theta, \tag{2.3}$$

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

уравнения для функций распределения по массам капель $f_1(\vec{r},m,t)$ и ледяных частиц $f_2(\vec{r},m,t)$ и осколков замерзания $f_3(\vec{r},m,t)$ имеют следующий вид [27]:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t}+u\frac{\partial f_1}{\partial x}+v\frac{\partial f_1}{\partial y}+(w-V_1)\frac{\partial f_1}{\partial z}=\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{КД}+\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{КГ}+\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{АК}+$$
$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{ДР}+\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{З}+\Delta' f_1+I_1,$$
$$\frac{\partial f_2}{\partial t}+u\frac{\partial f_2}{\partial x}+v\frac{\partial f_2}{\partial y}+(w-V_2)\frac{\partial f_2}{\partial z}=\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{С}+\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{АК}+\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{З}+$$
$$\Delta' f_2+I_2+I_{АВ} \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial t}+u\frac{\partial f_3}{\partial x}+v\frac{\partial f_3}{\partial y}+(w-V_2)\frac{\partial f_3}{\partial z}=\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{З}+\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{АК}+\Delta' f_3$$

уравнения для расчета количества электричества

$$\begin{aligned}\rho_- &= a_2\int_0^\infty m f_2 dm-\rho_2\\ \rho_+ &= a_3\int_0^\infty m f_3 dm-\rho_3\end{aligned}, \tag{2.5}$$

уравнение Пуассона для потенциала электростатического поля

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}=-\frac{\rho_Э}{\varepsilon_0}, \tag{2.6}$$

Начальные условия для уравнений (2.1)-(2.6) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} &u(\vec{r},0)=u_0(\vec{r}), v(\vec{r},0)=v_0(\vec{r}), w(\vec{r},0)=w_0(\vec{r}),\\ &\theta(\vec{r},0)=\theta_0(\vec{r}), s(\vec{r},0)=s_0(\vec{r}),\\ &f_1(\vec{r},m,0)=f_2(\vec{r},m,0)=f_3(\vec{r},m,0)=0,\ \rho_-(\vec{r},0)=\rho_+(\vec{r},0)=0 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Граничные условия соответственно:

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

$$\begin{aligned} &u(\vec{r},t)=v(\vec{r},t)=w(\vec{r},t)=0, \theta(\vec{r},t)=\theta_0(\vec{r}), s(\vec{r},t)=s_0(\vec{r})\Big|_{z=0}\\ &f_1(\vec{r},m,t)=f_2(\vec{r},m,t)=f_3(\vec{r},m,t)=0\Big|_{x=0,L_x;y=0,L_y;z=L_z} \end{aligned} \tag{2.8}$$

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

$$\partial U(\vec{r},t)/\partial x=0\Big|_{x=0,L_x},\ \partial U(\vec{r},t)/\partial y=0\Big|_{y=0,L_y},$$

$$\partial U(\vec{r},t)/\partial z=0\Big|_{z=L_z}, U(\vec{r},t)=0\Big|_{z=0}$$

Система уравнений применяется относительно пространственно-временной области:

$$0\le x\le L_x,\quad 0\le y\le L_y,\quad 0\le z\le L_z,\quad 0\le m<\infty,\quad t>0.$$

Коэффициент турбулентной диффузии рассчитывается по формулам, предложенным в работах [16,39,90,95,101]. В ряде случаев использовалась следующая формула [71]:

$$K = C \cdot L_T^2 \left[\sum_{i,j=1}^{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right]^{1/2}, \qquad (2.9)$$

в приведенном выражении C - это безразмерная константа, L_T - характерный масштаб турбулентности.

Для описания коагуляционных процессов в облаке применяется интегро-дифференциальное уравнение в виде [71,167]:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{КГ} = -f_1(\vec{r}, m, t) \int_0^{\infty} \beta_1(m, m') \cdot f_1(\vec{r}, m', t)\, dm' + \int_0^{m/2} f_1(\vec{r}, m - m', t) \beta_1(m, m - m') f_1(\vec{r}, m', t)\, dm', \qquad (2.10)$$

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.

Линейный коэффициент столкновений для капель радиусом r < 400 мкм рассчитывается по аппроксимационной формуле [153]:

$$E_1 = 1 + P_1 - A_1 \cdot P_1^{-C_1} - B_1 \cdot (1 - P_1)^{-D_1} \qquad (2.11)$$

где $P_1 = r/r'$; $A_1 = 27{,}2\ r^{-1{,}645}$; $B_1 = 58{,}5\ r^{-1{,}9}$; $C_1 = (15{,}24/r)^4 + 1{,}13$;

$D_1 = (16{,}65/r)^8 + 0{,}00393\, r' + 0{,}98.$

Для капель с радиусом более 400 мкм коэффициент столкновения определяется по предельной формуле $E_1 = 1 + P_1$.

Расчет взаимодействия капель и кристаллов проводится на основе следующих соотношений:

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{АК} = -f_1(\vec{r},m,t)\int_0^{\infty}\beta_2(m,m')\cdot f_2(\vec{r},m',t)dm', \qquad (2.12)$$

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{АК} = -f_2(\vec{r},m,t)\int_0^{\infty}\beta_2(m,m')\cdot f_1(\vec{r},m',t)dm' + \int_0^{m}\beta_2(m,m-m')f_2(\vec{r},m-m',t)f_1(\vec{r},m',t)dm', \qquad (2.13)$$

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. Выражение (2.13) справедливо в предположении, что столкновение кристаллов с каплями приводит к замерзанию последних.

При численном решении уравнений коагуляции используется метод Берри-Рейнхарда [167]. Применяются преобразования переменных $m = m_0\exp[3\cdot(I-1)/I_0]$, $I_0 = 6/\ln 2$ и функции распределения $G(I)dI = m\cdot f(m)\cdot dm$. Значения функции $G(I)$ в промежутке между узлами рассчитываются с помощью интерполяции значений функции в близлежащих узлах.

Скорость падения капель аппроксимируется выражениями [82]:

$$V_1(r_i) = \begin{cases} \mu_1 r_i^2 & \text{при } 2 \le r_i \le 66 \text{ мкм}, \ \mu_1 = 1{,}2\cdot 10^6\ \text{см}^{-1}\text{с}^{-1}, \\ \mu_2 r_i & \text{при } 66 \le r_i \le 600 \text{ мкм}, \ \mu_2 = 8\cdot 10^3\ \text{с}^{-1}, \\ \mu_3 r^{1/2} & \text{при } r_i > 600 \text{ мкм}, \ \mu_3 = 2\cdot 10^3\ \text{см}^{1/2}\text{с}^{-1}. \end{cases} \qquad (2.14)$$

Для вычисления скорости падения кристаллических частиц применяются аппроксимационные формулы, предложенные в работах [87,153] для кристаллов различного типа:

$$V_2(r_i) = a\cdot D_r^b, \qquad (2.15)$$

где V_2 – скорость падения частицы в м/с, D_r – диаметр капли, имеющей массу, равную массе кристалла размером r_i в мм, a и b - константы, зависящие от формы кристалла. При выборе значений констант в (2.15) принимаются во внимание общие закономерности зависимости формы кристаллов от температуры, которые состоят в том, что при -10 °C < T ≤ 0 °C преобладают крупа и столбчатые кристаллы, при -20 °C < T ≤ -10 °C – пластинчатые и дендритовые кристаллы, а при T ≤ -20 °C – кристаллы в виде призм. Кроме того, в расчетах учитываются различия в плотности разных кристаллов.

Скорости падения капель и кристаллов корректируются с учетом изменения плотности воздуха с высотой по формуле [153]:

$$V_i(z) = V_i(0) \cdot \left(\frac{\rho_a(0)}{\rho_a(z)} \right)^{0.5}, \qquad (2.16)$$

где $V_i(0)$ и $\rho_a(0)$ – скорость падения частиц и плотность воздуха у земли соответственно, $\rho_a(z)$ – плотность воздуха на высоте z.

Изменение функции $f_1(\vec{r}, m, t)$ вследствие дробления капель рассчитывается по формуле [71]:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{ДР} = -P_{dr}(m) f_1(\vec{r}, m, t) + \int_m^\infty Q(m, m') P_{dr}(m') f_1(\vec{r}, m', t) dm', \qquad (2.17)$$

где $P_{dr}(m)$ - вероятность распада в единицу времени капли массой m, $Q(m, m')$ есть вероятность образования капли массой m при распаде капли массой m'. Для расчета $P_{dr}(m)$ используется выражение [71]:

$$P_{dr}(m) = 2{,}94 \cdot 10^{-7} \exp(34\, r(m)). \qquad (2.18)$$

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

$$Q(m,m') = \frac{145{,}37}{m}\,\frac{r(m)}{r(m')}\,exp\left(-7\,\frac{r(m)}{r(m')}\right). \qquad (2.19)$$

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

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_з = -\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_з = -R_{fr}(\vec{r},m)\,f_1(\vec{r},m,t), \qquad (2.20)$$

$$R_{fr}(\vec{r},m) = A_{fr}\cdot \exp\left\lfloor B_{fr}\cdot\left(T_{md}(m) - T_c(\vec{r})\right)\right\rfloor, \qquad (2.21)$$

где A_{fr}, B_{fr} - параметры; $T_{md}(m)$ — медианная температура замерзания капель массой m ; T_c — температура воздуха в выбранной точке в ^{o}C.

На основе аппроксимации экспериментальных данных по исследованию зависимости медианной температуры замерзания капель от их размеров, представленных в работе [71], для T_{md} было получено выражение:

$$T_{md}(m) = -48{,}46\cdot r(m)^{-0{,}125}, \qquad (2.22)$$

где $r(m)$ - радиус капли в микрометрах.

Образование новых капель на ядрах конденсации учитывает слагаемое $I_1(\vec{r},m,t)$. Этот процесс описывается формулой [27]:

$$I_1(\vec{r},m,t) = \frac{\alpha\left(q_в(\vec{r}) - q_н(\vec{r})\right)\cdot \psi_1(\vec{r},m)}{q_w\left(\psi_1\right)} \qquad (2.23)$$

где $q_в(\vec{r})$ – влажность воздуха в точке $(\vec{r})$; $q_н(\vec{r})$ – влажность насыщенного водяного пара в этой же точке; α - численный коэффициент; $\psi_1(\vec{r},m)$ –

заданное распределение капель в той же точке; $q_w(\psi_1)$ - суммарная водность заданного распределения капель. Тем самым принимается, что влага, превышающая значение насыщенного водяного пара в данной точке мгновенно конденсируется, превращаясь в капли с распределением, аналогичным спектру $\psi_1(\vec{r},m)$. Процесс образования кристаллов на ядрах сублимации $I_2(\vec{r},m,t)$ описывается по аналогичной формуле.

Учет процессов испарения, конденсации и сублимация осуществляется с помощью выражений:

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{КД} = -\frac{\partial}{\partial m}\left(f_1(\vec{r},m,t)\frac{dm}{dt}\right), \tag{2.24}$$

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{C} = -\frac{\partial}{\partial m}\left(f_2(\vec{r},m,t)\frac{dm}{dt}\right) \tag{2.25}$$

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

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi\rho r^2\frac{dr}{dt}. \tag{2.26}$$

Формулы для описания испарения и роста частиц имеют следующий вид [36,82,87,252]:

$$\frac{dr_w}{d\tau} = D\frac{\rho_{вх}}{\rho_w}\frac{1}{r_w}\frac{\mu}{M}\frac{e_w}{P}(f_w - 1), \tag{2.27}$$

$$\frac{dr_i}{d\tau} = D\frac{\rho_{вх}}{\rho_i}\frac{1}{r_i}\frac{\mu}{M}\frac{e_w}{P}\left(f_w - \frac{e_i}{e_w}\right), \tag{2.28}$$

где D - коэффициент молекулярной диффузии пара; r_w и r_i - радиусы капель и ледяных частиц соответственно; P - давление воздуха; $\rho_w, \rho_i, \rho_{вх}$ - плотность воды, льда и воздуха соответственно; μ, M - молекулярные массы водяного пара и воздуха; e_w, e_i - давление насыщенного водяного пара при температуре облака над водой и льдом; f_w - относительная влажность воздуха.

Для решения уравнений конденсации и сублимации необходим расчет пересыщения в облаке. В уравнениях (2.27)-(2.28), кроме r_w и r_i, зависит от времени также и относительная влажность f_w. Для определения f_w используется уравнение, основанное на балансе парообразной и сконденсировавшейся влаги [71]:

$$\frac{df_w}{d\tau} = -4\pi D\left[n_w r_w (f_w - 1) + n_i r_i \left(f_w - \frac{e_i}{e_w} \right) \right]. \qquad (2.29)$$

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 [27].

При моделировании естественного хода эволюции облака функция источника искусственных кристаллов равняется нулю. В случае с активным воздействием задается конкретный вид функции $I_{AB}(\vec{r}, m, t)$, соответствующий определенному способу внесения реагента.

В модели детально учитываются процессы электризации облачных частиц на основе исследованных 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 [4,6].

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:

$$q(m) = a_e \cdot m, \tag{2.30}$$

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

Образование осколков при замерзании капель учитывается следующим образом:

$$\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_3 = \int_m^\infty n(m,m')R(\vec{r},m',t)f_1(\vec{r},m',t)dm', \tag{2.31}$$

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

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

$$\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{AK} = \int_m^\infty n(m,m')R_2(\vec{r},m',t)dm', \tag{2.32}$$

где $R_2(\vec{r},m',t)=f_1(\vec{r},m',t)\cdot\int_0^{\infty}\beta_2(m',\xi)f_2(\vec{r},\xi,t)d\xi$ - число столкновений кристаллов массой ξ 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 Высокогорном геофизическом институте и из литературных источников [6,269,270,271].

При развитии облака микроскопические осколки замерзания выносятся потоками в верхнюю его часть, где образуется преимущественно положительный объемный заряд $\rho_+(\vec{r},t)$. Сосредоточение отрицательно заряженных ледяных частиц в средней части облака образует зону преимущественно отрицательного объемного заряда $\rho_-(\vec{r},t)$.

Объемные заряды на временном шаге рассчитывались по формулам (2.5), при этом уменьшение объемных зарядов в результате тока проводимости атмосферы и разрядов, вычислялось по формулам [73]:

$$\rho_2(\vec{r},t)=\lambda' E(\vec{r},t)+\gamma\sum_i\rho_-(\vec{r},t_i),$$

$$\rho_3(\vec{r},t)=\lambda' E(\vec{r},t)+\gamma\sum_i\rho_+(\vec{r},t_i). \qquad (2.33)$$

При моделировании на каждом временном шаге рассчитываются объемные заряды в облаке, потенциал электростатического поля, создаваемого этими зарядами, а также горизонтальные и вертикальная составляющие вектора напряженности электрического поля облака.

Значения суммарного объемного заряда $\rho_Э(\vec{r})$ используются для определения потенциала $U(\vec{r})$ электростатического поля. Для этого на каждом временном шаге решается трехмерное уравнение Пуассона (2.6).

Напряженность электрического поля $\vec{E}(x,y,z)$ в точке (x,y,z) определяется по формуле:

$$\vec{E}(x,y,z) = -\left(\vec{n}_x \frac{\partial U}{\partial x} + \vec{n}_y \frac{\partial U}{\partial y} + \vec{n}_z \frac{\partial U}{\partial z} \right). \quad (2.34)$$

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 [77,78,80,81].

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

$$Z_{rad}(\vec{r},t) = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left(\int_0^{r_1 \max} \sigma_1(r,\lambda) \cdot f_1(x,y,z,r,t) \cdot dr + \int_0^{r_2 \max} \sigma_2(r,\lambda) \cdot f_2(x,y,z,r,t) \cdot dr \right), \quad (2.35)$$

где Z_{rad} - радиолокационная отражаемость в dBZ, $\sigma_1(r,\lambda)$ и $\sigma_2(r,\lambda)$ - поперечные сечения обратного рассеяния соответственно для капель и кристаллов радиуса *r* на длине волны излучения λ [32,53,106,109].

2.2 Дискретное представление задачи

Конечно-разностные аппроксимации дифференциальных операторов изложены в работах [34,83]. Производная функции $u(\vec{r})$ в узлах трехмерной пространственной сетки с индексами i, j, k приближенно вычисляется через значения в соседних узлах:

$$\left.\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{i,j,k} = \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}}{\Delta x} + \mathrm{O}(\Delta x), \qquad (2.36)$$

где разность $(u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k})/\Delta x$ это конечно-разностное представление производной $(\partial u/\partial x)_{i,j,k}$, $\mathrm{O}(\Delta x)$ - погрешность аппроксимации.

Применение различных схем и погрешность аппроксимации для различных типов дифференциальных уравнений в частных производных исследованы в [13]. Выбор численных схем для модели облака обоснован в работах [13,71,83].

Для дискретного представления задачи (2.1) - (2.35) в интервалах изменения пространственных переменных $x \in [0, L_x], y \in [0, L_y], z \in [0, L_z]$ и масс капель и ледяных кристаллов $m \in [m_1, M_{max}]$, фиксируются точки (узлы) x_i, y_j, z_k и m_n, $i \in [0:N_x], j \in [0:N_y], k \in [0:N_z], n \in [1:N_m]$, где N_x, N_y, N_z, N_m - число точек сетки по соответствующим переменным.

Функции непрерывных аргументов, входящие в уравнения модели, аппроксимируются вектор-функциями – значениями аппроксимируемых функций в узлах сетки. Для удобства в последующих формулах для узлов сетки будут использованы верхние индексы.

В дискретной форме для переменных $u(\vec{r},t)$, $v(\vec{r},t)$, $w(\vec{r},t)$, $K(\vec{r},t)$ $f_1(\vec{r},m,t)$, $f_2(\vec{r},m,t)$, $f_3(\vec{r},m,t)$, $I_1(\vec{r},m,t)$, $I_2(\vec{r},m,t)$ имеем следующие вектор-функции в узлах пространственной сетки (i,j,k) и сетки по массе частиц (n):

$$f_1^{ijkn}(t) \equiv f_1(x_i, y_i, z_k, m_n, t),$$

$$f_2^{ijkn}(t) \equiv f_2(x_i, y_i, z_k, m_n, t),$$

$$f_3^{ijkn}(t) \equiv f_3(x_i, y_i, z_k, m_n, t),$$

$$u^{ijk}(t) \equiv u\left(x_i, y_j, z_k, t\right), \qquad (2.37)$$

$$v^{ijk}(t) \equiv v\left(x_i, y_j, z_k, t\right),$$

$$w^{ijk}(t) \equiv w\left(x_i, y_j, z_k, t\right),$$

$$v_1^n \equiv v_1(m_n),$$

$$v_2^n \equiv v_2(m_n),$$

$$K^{ijk} \equiv K\left(x_i, y_j, z_k\right),$$

$$I_1^{ijkn}(t) \equiv I_1\left(x_i, y_j, z_k, m_n, t\right),$$

$$I_2^{ijkn}(t) \equiv I_2\left(x_i, y_j, z_k, m_n, t\right),$$

$$I_{AB}^{ijkn}(t) \equiv I_{AB}\left(x_i, y_j, z_k, m_n, t\right),$$

и т.д.

Уравнения для дискретных функций распределения по массам $f_1^{ijkn}(t), f_2^{ijkn}(t), f_3^{ijkn}(t)$, с учетом замены дифференциальных операторов $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}, \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ разностными выражениями, примут вид:

$$
\begin{aligned}
df_1^{ijkn}(t)/dt = {} & \left(K_x^{ijk} - u^{ijk}\right)\left(f_1^{i+1\,jkn}(t) - f_1^{ijkn}(t)\right)/(\Delta x) \\
& + \left(K_y^{ijk} - v^{ijk}\right)\left(f_1^{ij+1\,kn}(t) - f_1^{ijkn}(t)\right)/(\Delta y) \\
& + \left(V_1^n + K_z^{ijk} - w^{ijk}\right)\left(f_1^{ijk+1\,n}(t) - f_1^{ijkn}(t)\right)/(\Delta z) \\
& + K^{ijk}\left(\left(f_1^{i+1\,jkn}(t) - 2f_1^{ijkn}(t) + f_1^{i-1\,jkn}(t)\right)/\Delta x^2\right) \\
& + K^{ijk}\left(\left(f_1^{ij+1\,kn}(t) - 2f_1^{ijkn}(t) + f_1^{ij-1\,kn}(t)\right)/\Delta y^2\right) \\
& + K^{ijk}\left(\left(f_1^{ijk+1\,n}(t) - 2f_1^{ijkn}(t) + f_1^{ijk-1\,n}(t)\right)/\Delta z^2\right) \\
& + \Phi_1^{ijkn}\left(\left\{f_1^{ijkn}(t), f_2^{ijkn}(t), f_3^{ijkn}(t), n \in [1 : N_m]\right\}\right) + I_1^{ijkn}(t),
\end{aligned}
\tag{2.38}
$$

$$
\begin{aligned}
df_2^{ijkn}(t)/dt = {} & \left(k_x^{ijk} - u^{ijk}\right)\left(f_2^{i+1\,jkn}(t) - f_2^{ijkn}(t)\right)/(\Delta x) \\
& + \left(k_y^{ijk} - v^{ijk}\right)\left(f_2^{ij+1\,kn}(t) - f_2^{ijkn}(t)\right)/(\Delta y) \\
& + \left(V_2^n + k_z^{ijk} - w^{ijk}\right)\left(f_2^{ijk+1\,n}(t) - f_2^{ijkn}(t)\right)/(\Delta z) \\
& + k^{ijk}\left(\left(f_2^{i+1\,jkn}(t) - 2f_2^{ijkn}(t) + f_2^{i-1\,jkn}(t)\right)/\Delta x^2\right. \\
& + k^{ijk}\left(\left(f_2^{ij+1\,kn}(t) - 2f_2^{ijkn}(t) + f_2^{ij-1\,kn}(t)\right)/\Delta y^2\right. \\
& + k^{ijk}\left(\left(f_2^{ijk+1\,n}(t) - 2f_2^{ijkn}(t) + f_2^{ijk-1\,n}(t)\right)/\Delta z^2\right) \\
& + \Phi_2^{ijkn}\left(\left\{f_1^{ijkn}(t), f_2^{ijkn}(t), f_3^{ijkn}(t), n \in [1 : N_m]\right\}\right) \\
& + I_2^{ijkn}(t) + I_{AB}^{ijkn}(t).
\end{aligned}
\tag{2.39}
$$

$$
\begin{aligned}
df_3^{ijkn}(t)/dt = {} & \left(K_x^{ijk} - u^{ijk}\right)\left(f_3^{i+1\,jkn}(t) - f_3^{ijkn}(t)\right)/(\Delta x) \\
& + \left(K_y^{ijk} - v^{ijk}\right)\left(f_3^{ij+1\,kn}(t) - f_3^{ijkn}(t)\right)/(\Delta y) \\
& + \left(V_2^n + K_z^{ijk} - w^{ijk}\right)\left(f_3^{ijk+1\,n}(t) - f_3^{ijkn}(t)\right)/(\Delta z) \\
& + K^{ijk}\left(\left(f_3^{i+1\,jkn}(t) - 2f_3^{ijkn}(t) + f_3^{i-1\,jkn}(t)\right)/\Delta x^2\right. \\
& + K^{ijk}\left(\left(f_3^{ij+1\,kn}(t) - 2f_3^{ijkn}(t) + f_3^{ij-1\,kn}(t)\right)/\Delta y^2\right. \\
& + K^{ijk}\left(\left(f_3^{ijk+1\,n}(t) - 2f_3^{ijkn}(t) + f_3^{ijk-1\,n}(t)\right)/\Delta z^2\right) \\
& + \Phi_3^{ijkn}\left(\left\{f_1^{ijkn}(t), f_2^{ijkn}(t), f_3^{ijkn}(t), n \in [1 : N_m]\right\}\right)
\end{aligned}
\tag{2.40}
$$

В выражениях (2.38)-(2.40) $\Phi_1^{ijkn}(t)$, $\Phi_2^{ijkn}(t)$, $\Phi_3^{ijkn}(t)$ $\{i = 0..N_x$, $j = 0..N_y$, $k = 0..N_z$, $n = 1..N_m$, $t > 0\}$- функции, описывающие микрофизические процессы в узлах пространственной сетки, для каждого класса частиц (n).

Граничные условия для $f_1^{ijkn}(t), f_2^{ijkn}(t), f_3^{ijkn}(t)$ формулируются следующим образом:

$$f_1^{ijkn}(t) = f_2^{ijkn}(t) = 0, \text{ при } i = 0, N_x,\ j = 0, N_y,\ k = N_z,\ n = 1..N_m,\ t > 0.$$

$$\left.\begin{array}{l} f_1^{ijkn}(t) = f_1^{ijk+1n}(t) \\ f_2^{ijkn}(t) = f_2^{ijk+1n}(t) \end{array}\right\} \quad при \quad k = 0, \tag{2.41}$$

$$f_3^{ijkn}(t) = 0, \text{ при } i = 0, N_x,\ j = 0, N_y,\ k = 0, N_z,\ n = 1..N_m,\ t > 0.$$

В начальный момент времени (*t=0*) частицы в выделенной области отсутствуют:

$$f_1^{ijkn}(0) = f_2^{ijkn}(0) = f_3^{ijkn}(0) = 0,$$

$$i \in [0:N_x], j \in [0:N_y], k \in [0:\mathrm{N_z}],\ n \in [1:N_m]. \tag{2.42}$$

При решении уравнений (2.38)-(2.42) использовано преобразование, предложенное в [167]. Вместо массы m и спектра $f(m)$ с помощью соотношений $m_l = m_1 \exp[3 \cdot (l-1)/l_1]$, где $l_1 = 6/\ln 2$ и $mf(m)dm = \varphi(l)dl$ введены новые переменная l и спектр $\varphi(l)$. Преобразованное уравнение для $\varphi(l)$ сохраняет ту же форму, что и (2.6), где операторы $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_И$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_K$ и $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_K$ имеют вид [71]:

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_И = -\frac{\partial}{\partial l}\left[\frac{3l_1}{4\pi r_m^4 \rho_w}\frac{dr_m}{dt}\varphi(l)\right]m,$$

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_K = \int_1^{l-2} \frac{m^2}{m_c^2 m'} \varphi(l_c) K(l_c, l') \varphi(l') dl' - \varphi(l) \int_1^{l_m} \frac{1}{m'} K(l_c, l') \varphi(l') dl', \qquad (2.43)$$

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_Д = -\varphi(l) P(l) + \int_l^{l_m} \frac{m}{m'} \varphi(l') Q(l', l) P(l') dl'.$$

В этих выражениях $l_c = l + \ln(1 - m'/m) \ln\sqrt{2}$, $m = m(l)$, $m' = m(l')$, $m_c = m(l_c)$,

$$K(l, l') = \pi [r(l) + r(l')]^2 \; E(l, l') \, | v_1(l) - v_1(l') |, \; Q(l, l') = Q(m', m) dm/dl.$$

Граничные и начальные условия при замене f на φ, сохраняют форму (2.7)-(2.8).

Дискретные значения масс облачных частиц задавались следующим образом:

$$m_1 = 2{,}5 \cdot 10^{-10} \text{ (г)}, \quad m_{n+1} = 1.414 \cdot m_n, \quad n = 2..75. \qquad (2.44)$$

По массам капель сетка содержит 61 градацию, для кристаллов использованы 75 категорий масс [27].

Как известно, физические свойства облаков зависят от размеров частиц, их концентрации, фазового состояния. Исследованию этих вопросов посвящено множество работ в нашей стране и за рубежом. Вопросы влияния дисперсных сред на электромагнитное излучение (ЭМИ) подробно рассмотрены в работах [32,106,109,111].

Для расчета радиолокационной отражаемости при моделировании облака предварительно вычислены таблицы значений $\sigma_1(r, \lambda)$ и $\sigma_2(r, \lambda)$ для всех дискретных значений масс (радиусов) капель и кристаллов [123].

2.3 Численные методы и алгоритмы решения системы уравнений модели

При решении уравнений модели в частных производных использованы методы расщепления по физическим процессам и покомпонентного расщепления (локально - одномерные схемы) [83,154,156].

Согласно работе [156], дифференциальный оператор **A** и соответствующий ему разностный оператор Λ можно представить в виде суммы операторов, каждый из которых включает производные лишь по одной пространственной переменной и разности лишь вдоль одного направления соответственно. Всего пространственных направлений N. Такие дифференциальные и разностные операторы будем называть локально - одномерными. И дифференциальный, и разностный операторы записываются в виде суммы локально - одномерных:

$$A = \sum_{i=1}^{N} A_i, \qquad \Lambda = \sum_{i}^{N} \Lambda_i. \tag{2.45}$$

Для однородной задачи можно выписать схему расщепления по направлениям:

$$\begin{aligned} &\frac{u^{n+1/N} - u^{n}}{\tau} + \Lambda_1 u^{n+1/N} = 0, \\ &\frac{u^{n+2/N} - u^{n+1/N}}{\tau} + \Lambda_2 u^{n+2/N} = 0, \\ &\frac{u^{n+1} - u^{n+(N-1)/N}}{\tau} + \Lambda_n u^{n+1} = 0. \end{aligned} \tag{2.46}$$

Получена система разностных уравнений, каждое из которых не аппроксимирует исходное дифференциальное, но может быть легко решено (методом прогонки вдоль соответствующего направления, если разностные

операторы содержат лишь первые и вторые разности). Тем не менее, последовательно примененные друг за другом, они дают на следующем слое по времени решение с разумной точностью [156]. Говорят, что имеет место суммарная аппроксимация — результирующий оператор послойного перехода получился аппроксимирующим. Описанный выше способ называется иногда методом дробных шагов.

Решение систем уравнений типа (2.38)-(2.42) выполняется с использованием явных и неявных методов [13,34].

Применение неявных разностных схем к решению систем уравнений в частных производных параболического типа приводит к системам алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей. Такие системы уравнений получаются также в случае решения уравнения Лапласа блочными итерационными методами [13].

Методы решения для уравнения параболического типа на основе неявных разностных схем и алгоритмы прогонки для решения систем линейных уравнений с трехдиагональной матрицей изложены в работах [13,156].

Уравнения (2.38)-(2.42) решались по методике предиктор-корректор, которая позволяет рассчитать изменение φ в результате переноса облачных частиц ветром и турбулентными вихрями со вторым порядком точности по времени и пространству [71,143].

Интегралы рассчитывались по схеме, представленной в работе [167].

При расчете оператора $\left(\frac{\partial \mathrm{f}_1}{\partial \mathrm{t}}\right)_{\text{д}}$ предполагалось, что мгновенно дробятся все образующиеся в результате коагуляции капли, для которых j≥60 (r(j)≥3565 мкм). Выражение для $Q(m,m')$ в переменных j и j′ имеет вид:

$$Q(j',j)=\frac{7a}{j_0}\frac{r(j)}{r(j')}\exp\left[-7\frac{r(j)}{r(j')}\right], \qquad (2.47)$$

где $a = \left[\left(\xi^3 + 0{,}428\xi^2 + 0{,}122\xi + 0{,}0175\right)\exp\left(-7\xi\right) - 1{,}43\cdot 10^{-3}\right]^{-1}$, $\xi = r(1)/r(j')$.

При вычислениях использованы шаги Δt/10 для процесса конденсации. Контроль точности вычислений выполнялся путем определения баланса массы в системе.

Система уравнений (2.1) — (2.35), описывающая изменение во времени динамических и микрофизических характеристик облака, состоит из 3 уравнений движения, уравнений баланса тепла и влаги, (61+75+1=137) уравнений, описывающих спектр облачных капель, кристаллов и частиц микровыбросов. Помимо этого, для того чтобы решение удовлетворяло уравнению неразрывности, необходимо на каждом временном шаге решать трехмерное эллиптическое уравнение для возмущения давления. Одним из методов, широко используемых для решения таких задач, является метод расщепления, разработанный Г. И. Марчуком [83,84], усовершенствованный вариант этого метода — схема предиктор с дивергентным корректором — успешно применялся при моделировании кучевых облаков Р. Пастушковым [101]. Проведенные в [71] исследования, показали, что, несмотря на определенную сложность в реализации этой схемы, она обеспечивает необходимую устойчивость счета, аппроксимацию 2-го порядка точности по пространству и времени и является консервативной.

Реализация метода расщепления заключается в последовательном учете отдельных операторов системы уравнений: на первой половине шага Δt/2 в три этапа решались уравнения, определяющие предиктор:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \varphi^{m+1/6}}{\partial t} + u^m \frac{\partial \varphi^{m+1/6}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} K^m \frac{\partial \varphi^{m+1/6}}{\partial x},\\
&\frac{\partial \varphi^{m+2/6}}{\partial t} + v^m \frac{\partial \varphi^{m+2/6}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} K^m \frac{\partial \varphi^{m+2/6}}{\partial y},\\
&\frac{\partial \varphi^{m+3/6}}{\partial t} + w^m \frac{\partial \varphi^{m+3/6}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K^m \frac{\partial \varphi^{m+3/6}}{\partial z}.
\end{aligned} \qquad (2.48)$$

Здесь m — номер итерации по времени, $t_m \le t \le t_m + \Delta t/2,\ \varphi^m = \{u^m, v^m, w^m, \theta^m, s^m \ldots\}$ 4-й этап заключался в корректировке решения с помощью найденного для момента времени $t_m+\Delta t/2$ значения $\varphi^{m+3/6}$:

$$\varphi^{m+4/6} = \varphi^m - \left[\frac{\partial}{\partial x}(u\varphi)^{m+3/6} + \frac{\partial}{\partial y}(v\varphi)^{m+3/6} + \frac{\partial}{\partial z}(w\varphi)^{m+3/6}\right]\Delta t + \\ + \left[\varphi^{m+3/6}\left(\frac{\partial u^{m+3/6}}{\partial x} + \frac{\partial v^{m+3/6}}{\partial y} + \frac{\partial w^{m+3/6}}{\partial z}\right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial x}K^m\frac{\partial \varphi^{m+3/6}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}K^m\frac{\partial \varphi^{m+3/6}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}K^m\frac{\partial \varphi^{m+3/6}}{\partial z}\right]\Delta t. \qquad (2.49)$$

Уравнения (2.48) в конечно-разностном виде аппроксимировались центральными и направленными разностями для пространственных переменных, а также направленными разностями по времени. Получаемая при этом алгебраическая система решалась методом прогонки. Уравнение (2.49) решается по явной схеме.

На 5-м этапе проводился расчет процесса конденсации. Решаемые на этом этапе уравнения имеют следующий вид [71]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{L}{c_p}\frac{\theta^{m+4/6}}{T^{m+4/6}}M_к,$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -M_к, \qquad (2.50)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_{nucl}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{КД} + I_1,\ t_m \le t \le t_m + \Delta t.$$

Система уравнений (2.50) и (2.12) решалась с начальными условиями:

$$\begin{aligned} &\theta\Big|_{t=t_m} = \theta^{m+4/6},\ s\Big|_{t=t_m} = s^{m+4/6}, \\ &f_i\Big|_{t=t_m} = f^{m+4/6}, n_j\Big|_{t=t_m} = n^{m+4/6} \end{aligned}. \qquad (2.51)$$

По работе [71], она описывает влажноадиабатический процесс в некоторой массе воздуха, перемещающейся в течение времени Δt с постоянной скоростью $\vec{V}^{m+4/6}$. Это позволяет решать (2.50)-(2.51) в лагранжевой формулировке и использовать более мелкие шаги Δt/10, Δt/100, обеспечивающие устойчивость счета. Последовательность вычислений внутри 5-го этапа изложена в работе [71].

В конце динамического шага при $t = t_m + \Delta t$ новые значения функций $f(r_i)$ и $f_2(r_i)$ вычисляются методом интерполяции, сохраняющим число частиц и их массу. Значения функций $\theta, s,$ полученные на этом этапе, являются окончательными для данного шага Δt, поскольку неучтенные процессы коагуляции, распада, седиментации не оказывают на них заметного влияния.

Окончательные значения f_1^{m+1} и f_2^{m+1} получаются после вычисления процессов коагуляции, распада и седиментации, из которых наибольшие трудности связаны с расчетом коагуляционных интегралов. В модели использовалась методика [167], основанная на 6-точечной логарифмической интерполяции подынтегральной функции, а также на особо точных оценках интегральных сумм. Эта методика оценки интегральных сумм применяется и для расчета распада облачных капель.

На заключительном этапе решается система уравнений, описывающая адаптацию динамических полей [71]:

$$u^{m+1} = u^{m+4/6} - \frac{\partial \pi'}{\partial x}\Delta t,$$

$$v^{m+1} = v^{m+4/6} - \frac{\partial \pi'}{\partial y}\Delta t, \qquad (2.52)$$

$$w^{m+1} = w^{m+4/6} - \frac{\partial \pi'}{\partial z}\Delta t + g\Delta t\left[\frac{\theta^{m+1} - \theta_0(z)}{\theta_0(z)} + 0{,}61(s^{m+1} - s_0(z)) - s_L^{m+1}\right].$$

Продифференцировав уравнения (2.52) и потребовав выполнения уравнения неразрывности, приходим к трехмерному эллиптическому уравнению для возмущения давления:

$$\frac{\partial^2 \pi'^{m+1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \pi'^{m+1}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \pi'^{m+1}}{\partial z^2} - \sigma\frac{\partial^2 \pi'^{m+1}}{\partial z} = F^{m+1}(x, y, z),$$

$$F^{m+1} = \frac{1}{\Delta t}\left[(\nabla \vec{V})^{m+4/6} - \sigma w^{m+4/6}\right] +$$

$$+ g(\frac{\partial}{\partial z} - \sigma)\left[\frac{\theta^{m+1} - \theta_0(z)}{\theta_0(z)} + 0{,}61(s^{m+1} - s_0(z)) - s_L^{m+1}\right], \qquad (2.53)$$

$$\left.\frac{\partial \pi'}{\partial x}\right|_{x=0,L_x} = \left.\frac{\partial \pi'}{\partial y}\right|_{y=0,L_y} = 0,$$

$$\left.\frac{\partial \pi'}{\partial z}\right|_{z=0,L_z} = g\left(\frac{\theta'}{\theta_0} + 0{,}61s' - s_L\right).$$

Для решения уравнения (2.53) использовался неявный двухшаговый метод блочной верхней релаксации [34]. Уравнение (2.53) в конечно-разностном виде записывается так:

$$\pi_{i+1,j,k} + \pi_{i-1,j,k} + \pi_{i,j+1,k} + \pi_{i,j-1,k} + \pi_{i,j,k+1} + (1+\sigma h)\pi_{i,j,k-1} =$$

$$= (6+\sigma h)\pi_{i,j,k} + F_{ijk}h^2 . \qquad (2.54)$$

Здесь индексы i, j, k соответствуют переменным по осям x, y, z; h = Δx=Δy=Δz — шаг сетки.

Решение уравнения (2.54) методом -блочной релаксации разбивается на два этапа. При этом блок (группа) переменных, по которой проводится релаксация, обычно выбирается вдоль какой-нибудь оси. Так, для оси z (индекс k) для 1-го этапа m-й итерации имеем:

$$\pi_{i,j,k}^{m+1/2} - \frac{1+\sigma h}{6+\sigma h}\pi_{i,j,k-1}^{m+1/2} - \frac{1}{6+\sigma h}\pi_{i,j,k+1}^{m+1/2} =$$

$$\frac{1}{6+\sigma h}\left[\pi_{i-1,j,k}^{m+1} + \pi_{i,j-1,k}^{m+1} + \pi_{i,j+1,k}^{m} + \pi_{i+1,j,k}^{m} - F_{ijk}h^2\right]. \qquad (2.55)$$

Правая часть (2.55) на этом этапе известна, поскольку перебор неизвестных проводится в порядке возрастания индексов. Таким образом, уравнение (2.54) может быть решено обычным методом прогонки.

На 2-м этапе находятся значения π_{ilk}^{m+1}, окончательные для данной итерации

$$\pi_{ilk}^{m+1} = \tau\pi_{ilk}^{m+1/2} + (1-\tau)\pi_{ilk}^{m} . \qquad (2.56)$$

Параметр релаксации τ выбирается на основе экспериментов, в работах по численным методам рекомендовано его значение 1,8.

Аппроксимация уравнений модели в узлах пространственной сетки приводит к большой системе уравнений (≈10^6 узлов сетки). Особенность

систем, описываемых уравнениями параболического типа, такова, что вычислительные схемы могут применяться одновременно для групп переменных [96,97]. Для ускорения расчетов применяется распараллеливание потоков на отдельных ядрах вычислительной системы или на графических процессорах GPU.

Современные GPU имеют сотни процессоров, высокую пропускную способность памяти, поддержку вычислений с плавающей точкой, малое энергопотребление, поэтому эти устройства очень хорошо подходят для решения задач аэрогидродинамики и физики облаков.

Быстрый рост производительности графических процессоров (GPU) в течение последнего десятилетия открыл новые возможности для использования GPU в реальных приложениях, требующих больших вычислительных мощностей [38]. Несколько лет назад к решению подобных задач можно было прийти только путем использования суперкомпьютеров и кластеров с большим числом процессоров. Сейчас в распоряжении исследователей находятся гораздо более энергоэффективные и компактные устройства GPU с массивно-параллельной архитектурой, которые могут использоваться как сопроцессоры, значительно ускоряя расчеты.

Несколько лет назад появились инструменты для разработки прикладных программ для GPU - такие как CUDA, OpenCL, PGI Accelerator и др. Эти средства упростили разработку сложных приложений, эффективно использующих параллельную архитектуру GPU.

Наиболее эффективный код пока еще пишется вручную из-за сложности формализации распараллеливания.

В работе использован комбинированный подход, который включает ручную и полуавтоматическую декомпозицию. Распараллеливание вычислений обеспечивается средствами современных компиляторов (Nvidia nvcc [196], PGI c++/fortran [272], Intel c++/fortran [202]).

Библиотечные функции и большое число примеров выполнения вычислений на GPU приведены в руководстве по CUDA [196].

2.4 Трехмерная визуализация расчетных данных и радиолокационных параметров облаков

Для детального анализа объемных расчетных данных – параметров атмосферы и облачной среды в узлах пространственной сетки автором разработано программное обеспечение 3D визуализации [121,122,144].

Разработанное программное обеспечение трехмерной визуализации данных позволяет получать четкие представления о грозовых облаках, их структуре, влиянии физических процессов друг на друга.

Последние десятилетия характеризуются бурным развитием трехмерной компьютерной графики практически во всех сферах деятельности людей, в таких как: геология, наука, космос, тренажеры, игры и др. В метеорологии и геофизике внедряется в практику трехмерное изображение информации с метеорологических радиолокаторов, объемные изображения результатов математического моделирования и другой информации [180,198,199,201].

С использованием подпрограмм открытой графической библиотеки OpenGL [203] разработано оригинальное программное обеспечение трехмерной графики, которое способствует более качественной интерпретации широкого спектра геофизической информации и данных численного моделирования. В данном подразделе представлены некоторые возможности разработанного авторами программного обеспечения трехмерной визуализации параметров.

Побраны методы, которыми может быть решена задача объемной визуализации, с использованием возможностей стандартных графических акселераторов, поддерживающих DirectX и OpenGL. Объемные данные представляют собой трехмерный массив элементов, являющихся единицами 3D пространства. При этом такой массив содержит информацию о каждой точке трехмерного пространства. Применяются общие программные решения по повышению эффективности работы.

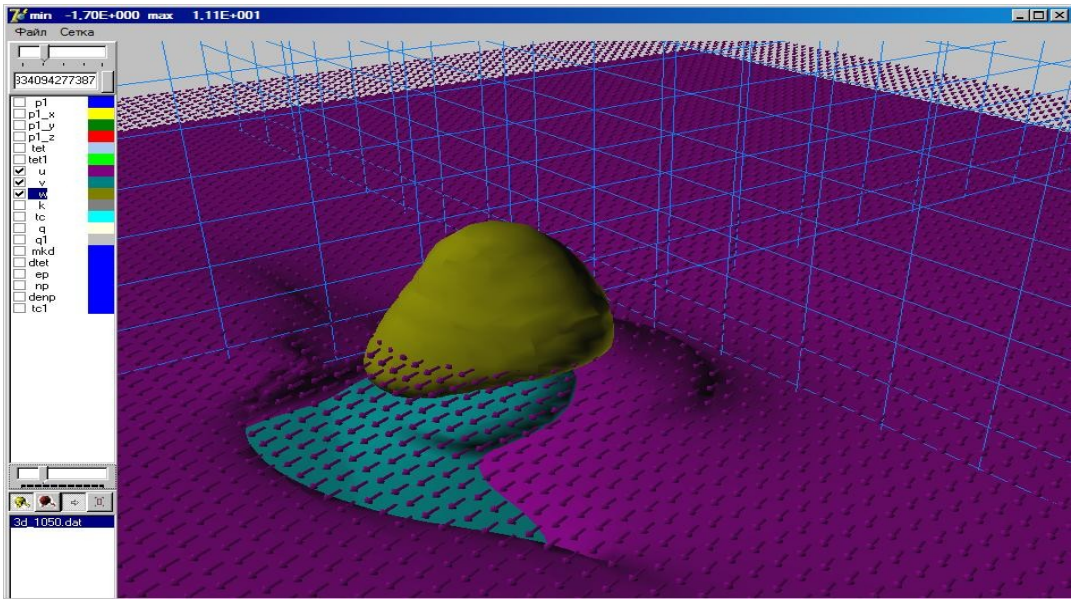


Рисунок 2.1 – Компоненты скорости ветра: u, v, w в программе трехмерного отображения данных моделирования. Стрелками указано направление фонового потока по аэрологическому зонду.

Построение трехмерного изображения какого-либо параметра в виде изоповерхности дает возможность увидеть его как объемный объект (рисунок 2.1), оценить его особенности. Значение нового видения, ставшего доступным в последние годы, весьма существенно для исследователей.

Разработано отображение метеорологических объектов на трехмерной поверхности Земли (рисунки 2.2- 2.3). Радиолокационные данные при отображении соотносятся с положением и размерами относительно координат радиолокационной станции и привязаны к области вывода. Цветовая палитра уровней отражаемости через 5 или 10 dBZ дает возможность изменять внешний порог отображения и последовательно просматривать положение вложенных уровней. Программа позволяет отображать дополнительные геоинформационные данные, в частности, картографическую информацию.

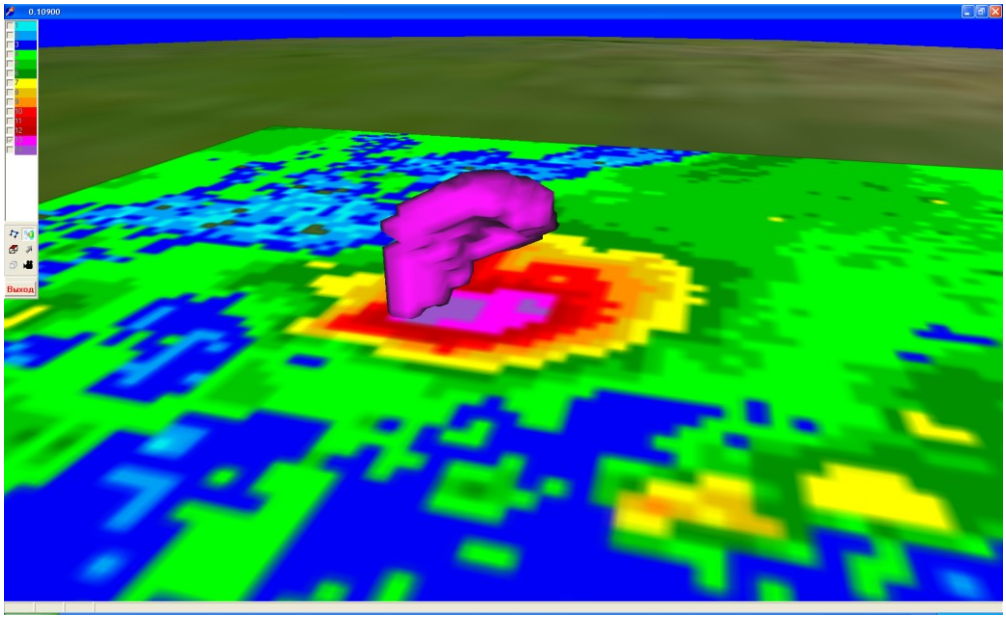


Рисунок 2.2 – Трехмерное изображение градового облака по результатам наблюдений автоматизированным радиолокатором МРЛ-5. Приведены изоповерхности уровня радиолокационной отражаемости 60 dBZ на фоне карты максимальной отражаемости Zmax

В диссертации широко использованы разработанные средства отображения трехмерных данных для их анализа и физической интерпретации.

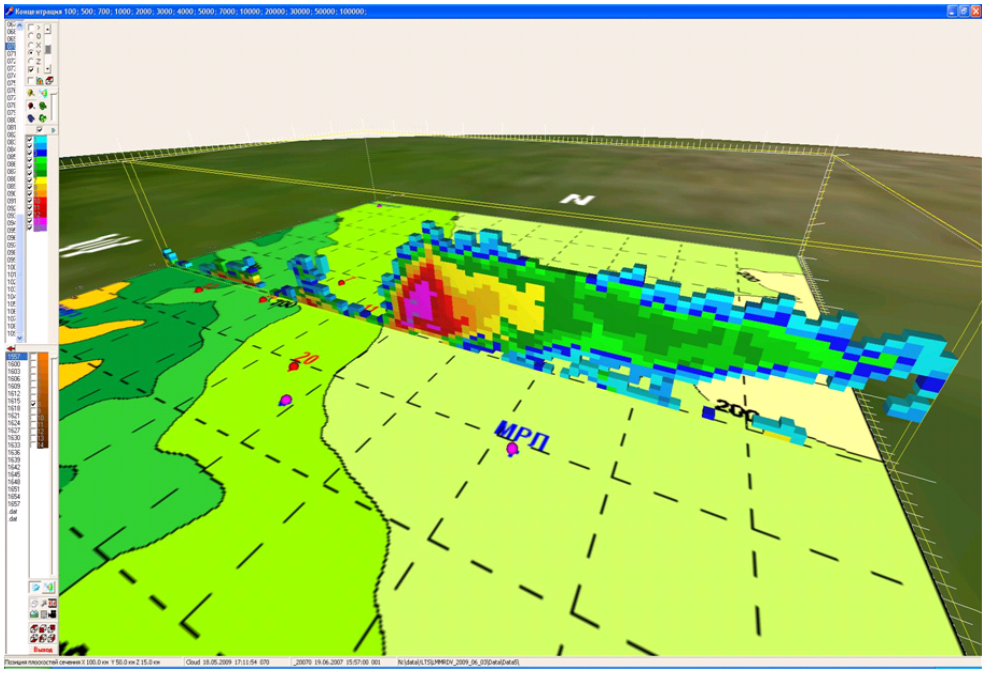


Рисунок 2.3 – Сечение градовой ячейки в виде тонкого слоя

2.5 Результаты тестовых расчетов по проверке численных схем

Расчеты по распространению консервативной примеси.

Для проверки устойчивости метода расчета ветрового и турбулентного переноса решалась задача о распространении и диффузии облака консервативной примеси в атмосфере с фоновым ветром [69,70]. Тестовая задача включает:

уравнение турбулентной диффузии в виде [39]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + w\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}K\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}K\frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial C}{\partial z}, \qquad (2.57)$$

граничные условия:

$C(x, y, z, t)=0$ при $x=0, L_x$, $y=0, L_y$ и $z=0, L_z$ $t\geq 0$, (2.58)

начальные условия:

$C(x, y, z, 0)=C_0 \cdot \exp(-(x_0-x)^2/B^2) \exp(-(y_0-y)^2/B^2) \exp(-(z_0-z)^2/B^2)$, (2.59)

где $C(x,y,z,t)$ – концентрация примеси в точке (x, y, z) в момент времени t, C_0 – максимальное значение концентрации; x_0, z_0 –координаты источника; B – параметр пространственного распределения.

Задача решалась в устойчиво стратифицированной атмосфере при следующих значениях параметров:

$C_0 = 10^3$ м$^{-3}$; $x_0 = 5$ км; $y_0 = 5$ км; $z_0 = 5$ км; B =500 м; K =300 м^{2}с$^{-1}$;

w = 3 мс$^{-1}$; u=v=3 мс$^{-1}$.

Интегрирование системы уравнений проводилось по пространственно-временной области $D \times T : \{0 \le x \le L_x, 0 \le y \le L_y, 0 \le z \le L_z, \tau > 0\}$. Размеры пространственной области составляли 16 км по горизонтали и по вертикали. Шаг сетки по осям x,y,z составлял 200 м, по времени – 5 с.

В данной задаче контрольной величиной является интегральное число частиц:

$$N(t) = \int_0^{L_x}\int_0^{L_y}\int_0^{L_z} C(x, y, z, t)dxdydz\,, \qquad (2.60)$$

которое должно сохраняться при интегрировании системы по времени:

$$N(t) = const\,. \qquad (2.61)$$

Контрольное время t_1 составляло 10 мин (600 с), t_2 составляло 20 мин (1200с). На рисунке 2.4. представлены результаты тестовых расчетов – приведены изоповерхности концентрации примеси С = 10 $м^{-3}$ в начальный момент времени t_0=0 и в момент времени t_2=20 мин. Интегральное число частиц соответственно равнялось N(0) = 10832, N(t_1) = 10823, N(t_2) = 10823. Как видно, условие (2.61) выполняется с высокой точностью.

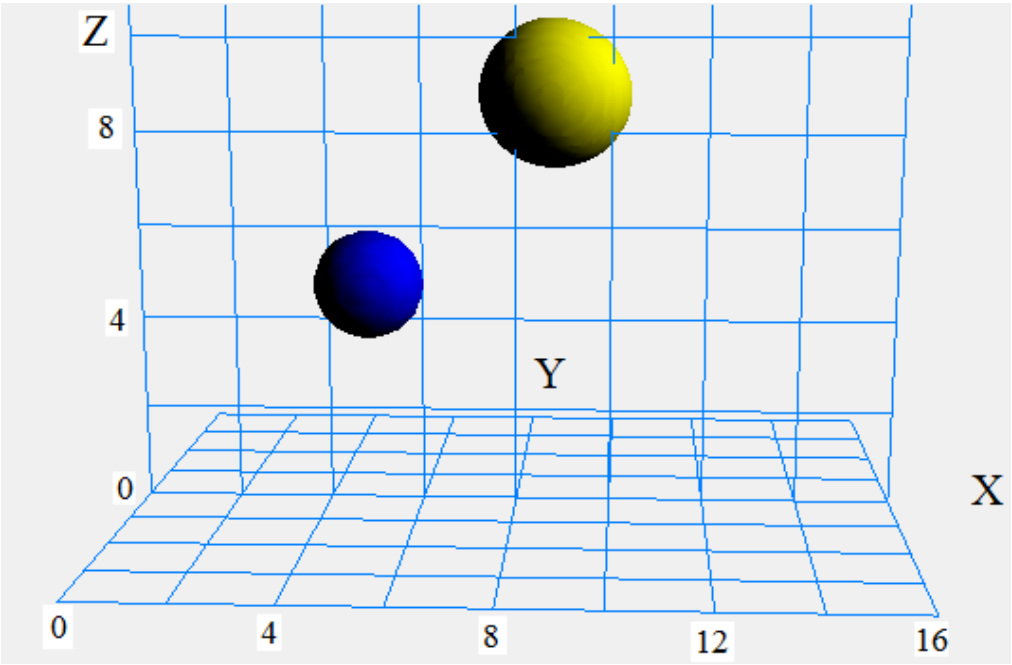


Рисунок 2.4 – Изоповерхности концентрации частиц С = 10 $м^{-3}$ в моменты времени t_0=0 (нижняя сфера) и t_2=20 мин (верхняя сфера)

Облако примеси переносится ветром и расширяется вследствие турбулентной диффузии, максимальная концентрация частиц со временем уменьшается. Через 5 минут она уменьшилась примерно на порядок и составила C_{max}=132,45 $м^{-3}$.

В момент времени t_0=0 на рисунке 2.4 максимальная концентрация частиц составляет C_{max}=1000 м$^{-3}$ (нижняя сфера). В момент времени t=10 мин C_{max}= 58,17 м$^{-3}$. В момент времени t=20 мин C_{max}= 23,01 м$^{-3}$ (верхняя сфера).

Тестовые расчеты коагуляции капель при стационарных условиях.

Тестовый пример решался также для задачи расчета коагуляционных процессов в пространственно-однородной системе, для которой должен выполняться закон сохранения массы всех капель:

$$M = \int_0^\infty mf(m)dm = const. \qquad (2.62)$$

Интегрирование уравнения (2.12) проводилось на интервале времени t= [0; 20] мин с шагом Δt = 10 с.

Начальное распределение капель по массам (размерам) было задано по формуле из работы [82]:

$$f(r) = Ar^2 \exp(-br), \qquad (2.63)$$

$A = 6\sqrt{12}r_0^{-3}$, $b = \sqrt{12}r_0^{-1}$, r_0=5*10^{-6} м .

Изменение концентрации частиц $N = \int_0^\infty f(m)dm$ и их интегральной массы (2.62) со временем (за 20 мин) представлены в таблице 2.1.

Распределение водности капель по градациям массы (размеров) приведено на рисунке 2.5 для двух моментов времени (t_1=0, t_2=20 мин).

На рисунке 2.6. приведены результаты моделирования осесимметричного капельного облака.

Результаты расчетов показывают, что водность в системе сохраняется с удовлетворительной точностью, что позволяет успешно применять в модели алгоритм расчета коагуляционных процессов, описанный выше.

Таблица 2.1 -Результаты тестовых расчетов уравнения коагуляции капель

t (с)	$N \cdot 10^8$ ($м^{-3}$)	M (г)	t (с)	$N \cdot 10^8$ ($м^{-3}$)	M (г)	t (с)	$N \cdot 10^8$ ($м^{-3}$)	M (г)	t (с)	$N \cdot 10^8$ ($м^{-3}$)	M (г)
10	4,43	0,707	310	3,92	0,708	610	3,43	0,705	910	2,95	0,701
20	4,41	0,707	320	3,90	0,708	620	3,41	0,705	920	2,93	0,701
30	4,39	0,707	330	3,89	0,708	630	3,40	0,705	930	2,92	0,701
40	4,38	0,708	340	3,87	0,708	640	3,38	0,705	940	2,90	0,701
50	4,36	0,708	350	3,85	0,708	650	3,36	0,705	950	2,89	0,700
60	4,34	0,708	360	3,84	0,707	660	3,35	0,704	960	2,87	0,700
70	4,33	0,708	370	3,82	0,707	670	3,33	0,704	970	2,86	0,700
80	4,31	0,708	380	3,80	0,707	680	3,31	0,704	980	2,84	0,700
90	4,29	0,708	390	3,79	0,707	690	3,30	0,704	990	2,82	6,998
100	4,27	0,708	400	3,77	0,707	700	3,28	0,704	1000	2,81	6,997
110	4,26	0,708	410	3,76	0,707	710	3,27	0,704	1010	2,79	6,995
120	4,24	0,708	420	3,74	0,707	720	3,25	0,704	1020	2,78	6,994
130	4,22	0,708	430	3,72	0,707	730	3,23	0,704	1030	2,76	6,992
140	4,21	0,708	440	3,71	0,707	740	3,22	0,703	1040	2,75	6,991
150	4,19	0,708	450	3,69	0,707	750	3,20	0,703	1050	2,73	6,989
160	4,17	0,708	460	3,67	0,707	760	3,19	0,703	1060	2,72	6,988
170	4,16	0,708	470	3,66	0,707	770	3,17	0,703	1070	2,70	6,986
180	4,14	0,708	480	3,64	0,706	780	3,15	0,703	1080	2,69	6,985
190	4,12	0,708	490	3,62	0,706	790	3,14	0,703	1090	2,67	6,983
200	4,11	0,708	500	3,61	0,706	800	3,12	0,703	1100	2,66	6,982
210	4,09	0,708	510	3,59	0,706	810	3,11	0,702	1110	2,64	6,980
220	4,07	0,708	520	3,57	0,706	820	3,09	0,702	1120	2,63	6,979
230	4,06	0,708	530	3,56	0,706	830	3,08	0,702	1130	2,61	6,977
240	4,04	0,708	540	3,54	0,706	840	3,06	0,702	1140	2,59	6,976
250	4,02	0,708	550	3,53	0,706	850	3,04	0,702	1150	2,58	6,975

260	4,01	0,708	560	3,51	0,706	860	3,03	0,702	1160	2,56	6,973
270	3,99	0,708	570	3,49	0,705	870	3,01	0,702	1170	2,55	6,972
280	3,97	0,708	580	3,48	0,705	880	3,00	0,701	1180	2,53	6,971
290	3,95	0,708	590	3,46	0,705	890	2,98	0,701	1190	2,52	6,970
300	3,94	0,708	600	3,44	0,705	900	2,97	0,701	1200	2,50	6,968

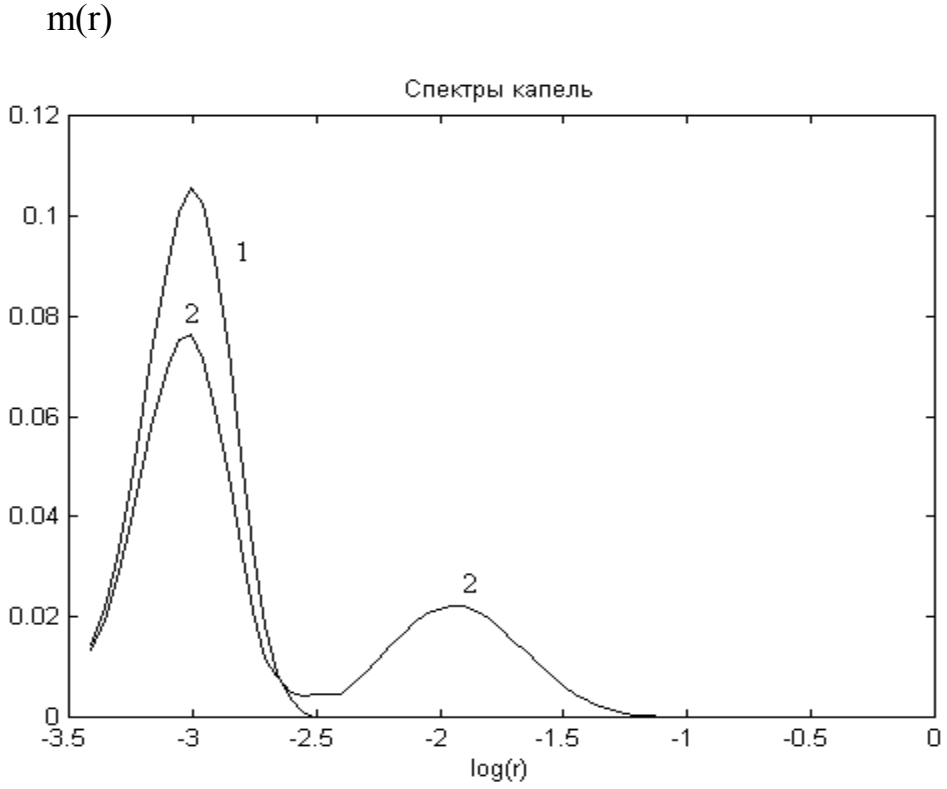


Рисунок 2.5 - Распределение водности по интервалам размеров капель для двух моментов времени t_1=0 (кривая 1) и t_2=20 мин (кривая 2). По оси абсцисс отложен радиус капель (см) в логарифмическом масштабе, по оси ординат – водность капель (г) в интервале размеров r÷ r+dr

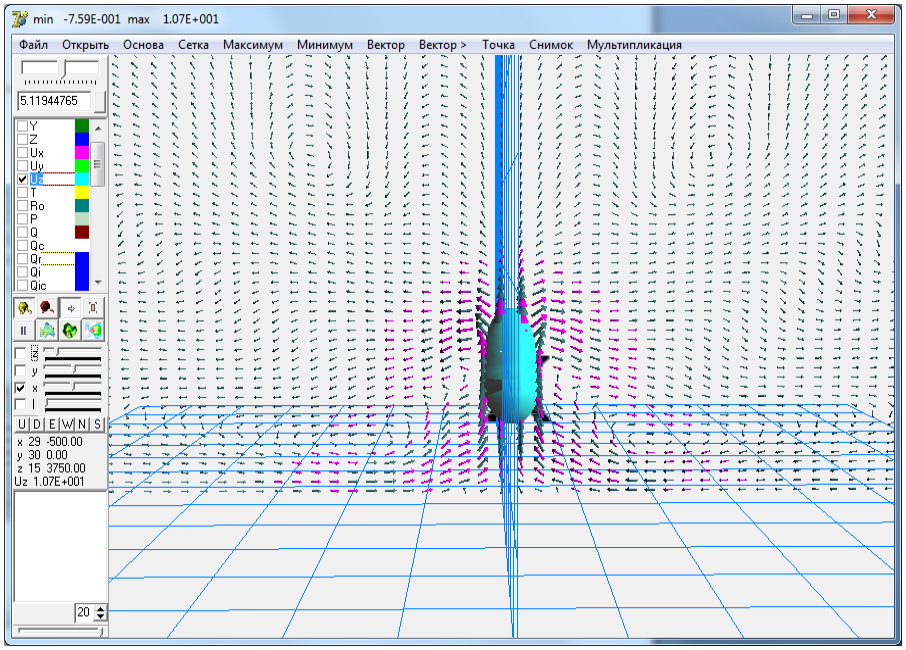


Рисунок 2.6 – Результаты моделирования осесимметричного облака на 20-й минуте развития. Приведена изоповерхность w=10 м/с, векторами изображена циркуляция воздуха в домене. Имеют место замкнутые тороидальные циркуляции вокруг облака (ниже максимума восходящих потоков и в верхней половине)

Варианты инициализация модели. При заполнении термодинамических параметров в узлах декартовой сетки по пространственным координатам применялась интерполяция данных зондирования на горизонтальные уровни с равномерным шагом по z. Это так называемое «горизонтально однородное» задание параметров атмосферы.

Нами разработан и применялся в исследованиях подход, основанный на использовании объемных данных по стратификации атмосферы [18,63]. Полученные по глобальной модели (GFS) данные с шагом 0,5 ^{o} по широте и долготе использовались для задания трехмерного поля горизонтального ветра и термодинамических параметров в пространственном домене. Такой подход является значительным улучшением ранее применяемого варианта инициализации моделей облаков, который ограничивался заданием на каждом высотном уровне горизонтально однородного распределения параметров

атмосферы в пределах области моделирования. При этом данные по высоте брались из аэрологического зонда.

Выводы к главе

Разработана трехмерная нестационарная численная модель конвективного облака с детальным описанием термодинамических, микрофизических и электрических процессов, которая отличается тем, что позволяет рассчитывать электрические параметры конвективных облаков, электрическую коагуляцию облачных частиц, исследовать взаимодействие физических процессов.

Формализован процесс накопления электрического заряда при замерзании капель и аккреции. Разработаны алгоритмы расчета системы уравнений модели, потенциала и напряженности электростатического поля, электрической коагуляции.

Разработано программное обеспечение трехмерной визуализации полученных при моделировании данных, адаптированное для исследования различных параметров конвективного облака. Программное обеспечение включает функции для детального анализа термодинамических и микроструктурных характеристик облаков в домене. Разработанное ПО позволяет эффективно интерпретировать результаты числительных экспериментов.

Применено трехмерное задание термодинамических параметров в области моделирования при инициализации модели.

Проведены тестовые расчеты, которые показали удовлетворительную точность вычислительных схем и алгоритмов. Модель в целом адекватно описывает процессы в конвективных облаках.

Глава 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ

В главе приведены результаты исследований закономерностей формирования микроструктурных и электрических параметров конвективных облаков. Исследования выполнены с помощью разработанной трехмерной модели с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов.

По результатам численных экспериментов определена роль взаимодействия физических процессов в формировании макроструктурных, микроструктурных и электрических параметров мощных конвективных облаков.

3.1 Результаты исследований формирования полей параметров конвективных облаков

На основе разработанной трехмерной модели были выполнены расчеты по моделированию конвективных облаков при различных реальных и модельных стратификациях атмосферы и характеристиках ветра.

Модель с детальной микрофизикой позволяет исследовать формирование микроструктурных характеристик облаков, образование осадков, накопление электрических зарядов, электрическую коагуляцию облачных частиц, взаимодействие физических процессов и другое [5,19,27,71,79].

Проверка модели проводилась на основе данных радиолокационных наблюдений и измерений характеристик грозоразрядной деятельности и напряженности электрического поля. Результаты сравнений свидетельствуют об удовлетворительной адекватности модели.

Пространственная область представляла собой прямоугольный параллелепипед. В зависимости от решаемых задач область бралась от 30x30x16 км до 60x60x16 км. Шаг по координатам X, Y и Z составлял от 200 до 1000 м, по времени от 1 до 10 с. Облако инициировалось заданием теплового импульса (импульсов) в начальный момент времени у поверхности земли с перегревом 1-5 ^{o}C.

В качестве входных параметров использовались данные аэрологического зондирования атмосферы в аэропорту г.Минеральные Воды (Ставропольский край) и данные глобальной модели [18]. С целью моделирования мощной быстроразвивающейся конвекции, выбирались дни, когда по факту в радиусе репрезентативности зонда (100 км) наблюдались ливни, грозы, град.

Для сопоставления с натурными материалами использовался обширный архив данных радиолокационных наблюдений с метеорологических радиолокаторов МРЛ-5 [5,109] Северо-Кавказской военизированной службы и современных доплеровских двухполяризационных ДМРЛ-С [54,58], расположенных в аэропортах г. Ставрополь и г. Минеральные Воды.

Анализ результатов расчетов выполнялся с помощью разработанного автором программного обеспечения трехмерной визуализации данных моделирования, адаптированного для изучения строения облаков.

Разработанная модель позволяет контролировать при расчетах большой ряд термодинамических, микроструктурных, радиолокационных и электрических параметров облака, в том числе:

- три компоненты вектора скорости воздушных потоков (*u, v, w*), м/с;
- потенциальная температура, K; отклонение потенциальной температуры от фона, K; температура воздуха, ^{o}C;
- безразмерное давление и его градиенты по осям x, y и z;
- коэффициент турбулентной диффузии, м^2/с;
- удельная влажность, г/кг; отклонение удельной влажности от фона, г/кг;

- 61 переменная по размерам облачных капель (f_1^n , $n = 1..61$, от 4 мкм до 4 мм по радиусу);
- 75 переменных по размерам ледяных частиц (f_2^n , $n = 1..75$, до 4 см по эффективному радиусу);
- концентрации капель и кристаллов, 1/м^3; водность и ледность, сумма водности и ледности, г/м^3;
- плотность водяного пара, г/м^3;
- давление водяного пара, Па; давление насыщенного водяного пара, Па;
- масса сконденсировавшейся воды, г;
- количество микрочастиц выбросов;
- положительный и отрицательный объемные заряды, Кл/м^3;
- электрический потенциал, В;
- составляющие напряженности электрического поля (E_x, E_y, E_z), В/см, модуль и направление вектора напряженности электрического поля, В/см;
- радиолокационная отражаемость на длинах волн 3, 5 и 10 см, dBZ.

Ниже будут представлены двумерные и трехмерные изображения перечисленных параметров.

Данные аэрологического зондирования атмосферы, пространственный домен, начальный тепловой импульс, распределение ветра в атмосфере при инициализации модели приведены на рисунке 3.1.

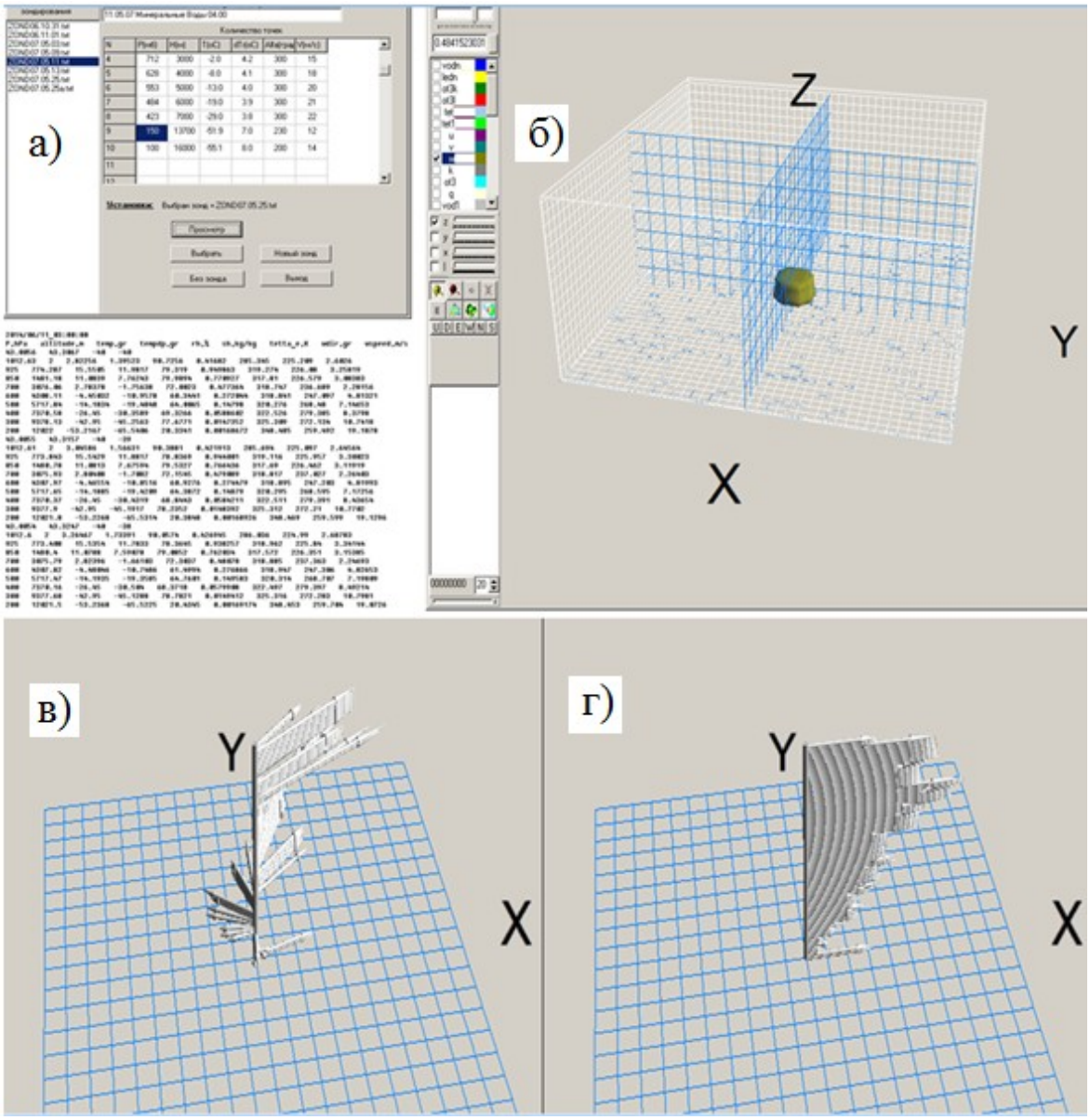


Рисунок 3.1 – Параметры инициализации модели: а) данные аэрологического зондирования, б) пространственная область (домен) с начальным импульсом у подстилающей поверхности, в) распределение горизонтального ветра по зонду, г) заданное (модельное) распределение горизонтального ветра

Остановимся на некоторых результатах численного моделирования термодинамических параметров конвективных облаков.

Состояние атмосферы, представленное данными зондирования, можно охарактеризовать следующим образом. До высоты 3,0 км стратификация практически нейтральная ($\gamma \approx 9{,}8$ °С/км). Далее до высоты 14 км градиент

температуры составляет в среднем 6,7 °С/км. Свыше 14 км наблюдается тропопауза.

На 15-й минуте от начального момента времени тепловой импульс достигает уровня конденсации, который находился на высоте 2,25 км, образовалось облако мощностью 2 км. Максимальное значение скорости восходящих потоков зафиксировано на высоте 2,5 км и составляет 3 м/с. Слева и справа от основного потока наблюдаются слабые нисходящие движения. Анализ поля горизонтальной составляющей скорости показывает, что от земли до уровня максимальной скорости (2,5 км) происходит вовлечение окружающего воздуха в основной поток, а выше появляется растекание потока. Коэффициент турбулентной диффузии достигает своего максимального значения 100 $м^2/с$ в местах, где потоки меняют направление. Максимальное отклонение температуры облака от температуры в невозмущенной среде составляет 0,4 °С. Амплитуда теплового импульса уменьшилась вследствие падения давления при подъеме воздуха и перемешивания с окружающей средой.

В процессе эволюции динамические параметры облака усиливаются, увеличиваются значения восходящих и нисходящих потоков воздуха. Через 20 минут от момента образования облака максимальная скорость $w_{\max}$ увеличивается до 10 м/с. Отрицательные значения вертикальной скорости w возрастают до 3-5 м/с. Коэффициент турбулентной диффузии на стадии развития облака имеет наибольшие значения в верхней части облака. Численные его значения составляют 300-500 $м^2/с$. Вследствие конденсации водяного пара образуется мелкокапельная фракция в облаке. Максимальное значение водности в центре облака составляет 0,5-1,0 $г/м^3$. За счет выделения теплоты при конденсации пара и падении температуры в окружающей среде с высотой отклонение температуры внутри облака увеличилось до 1,5 °С. Теплота, выделяющаяся при конденсации, служит источником энергии,

поддерживающей конвекцию. В верхней части облака (выше 5 км) появляются отрицательные пульсации температуры.

На рисунке 3.2 приведена структура потоков в облаке и изоповерхность $w = 10$ м/с. Удельная влажность и температура в области восходящих и нисходящих движений воздуха несколько деформировались по сравнению с фоновыми значениями на границах домена.

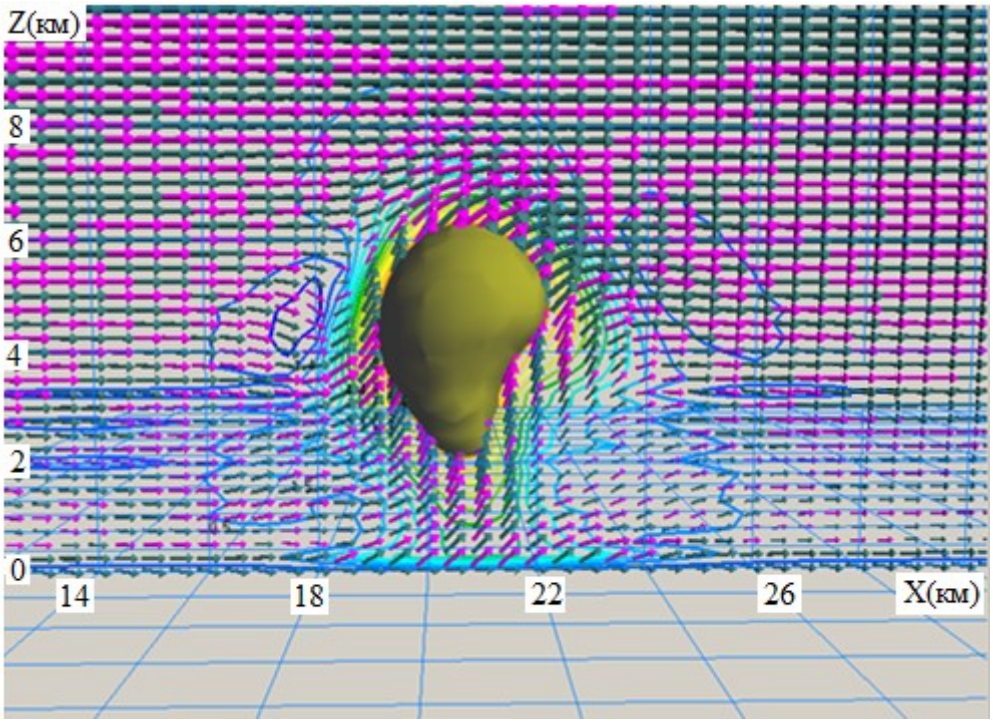


Рисунок 3.2 - Структура потоков в вертикальной плоскости, пересекающей облако по направлению его движения на 20-й минуте развития облака. Также приведены на рисунке изоповерхность W=10 м/с и вспомогательная сетка 2х2 км

Состояние термодинамических полей в рассматриваемой пространственной области на 40-й минуте развития облака (55-ая минута от начала расчета) демонстрируют рисунки 3.3-3.5. Изменение скоростей горизонтальных и вертикальных потоков незначительно, что свидетельствует о том, что облако достигло стадии максимального развития. Коэффициент турбулентной диффузии имеет значения 100÷1000 м^2/с. В области растекания

струи восходящего потока наблюдаются высокие значения коэффициента турбулентной диффузии (K=500-1000 м^2/с). Повышенная турбулентность может оказывать существенное влияние на формирование микроструктуры облака.

Процесс конденсации приводит к увеличению водности до 3-5 г/м^3, перегрева - до 3 °С. Отрицательные возмущения поля температуры в верхней части облака достигают значений около -1 °С.

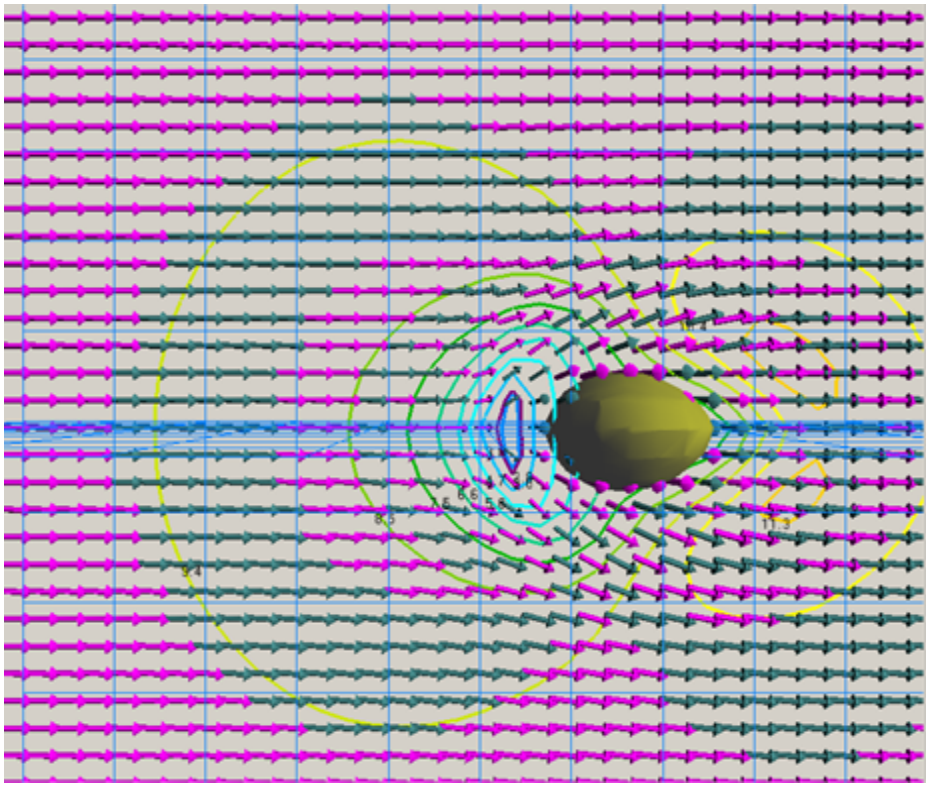


Рисунок 3.3 – Горизонтальный поток обтекает облако (уровень z=5000 м) в момент времени t=40 мин..

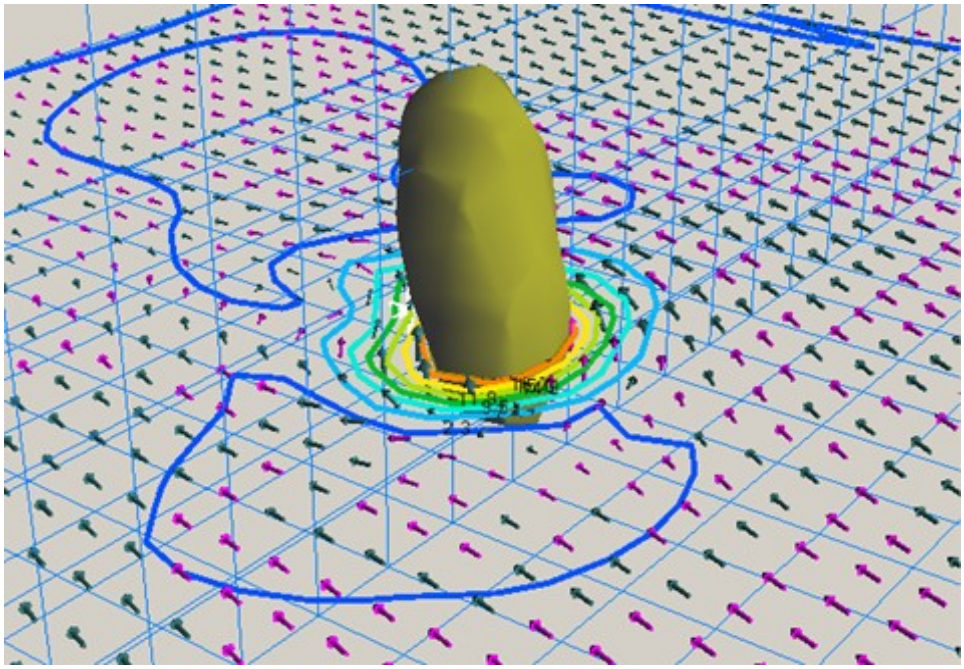


Рисунок 3.4 – Горизонтальные потоки на уровне z=4000 м в момент времени t=40 мин. Направление стрелок показывает, что потоки воздуха обтекают облако, и что за ним образуется гидродинамическая тень. Сплошная поверхность на рисунке - изоповерхность восходящего потока w = 15,6 м/с.

На 45-й минуте в облаке отмечаются нисходящие движения, которые вызваны падением частиц осадков. Выпадение осадков происходит слева от восходящего потока. Нисходящие потоки в зоне выпадения осадков усиливаются. Картина водности, ледности и радиолокационной отражаемости хорошо соответствует радиолокационной структуре мощных ливневых и грозовых облаков в атмосфере со сдвигом ветра.

С течением времени модельное облако перемещается по горизонтали под влиянием ветра, средняя скорость составляет 20-40 км/ч.

На рисунке 3.5 приведены результаты моделирования, в которых отмечается изменение фонового ветра в горизонтальной плоскости при наличии конвективного облака. Поле горизонтального ветра взаимодействует с облаком: поток растекается перед облаком, а в тыловой части частично заворачивает, попадая в облако.

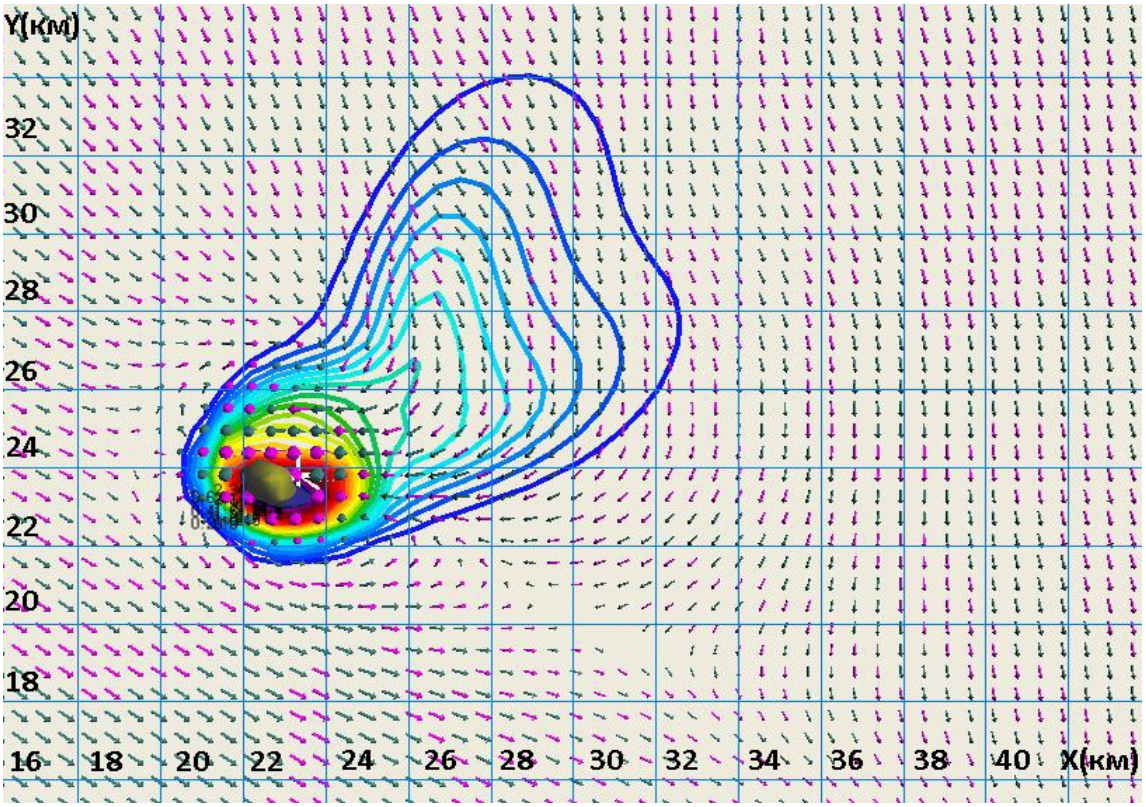


Рисунок 3.5 – Обтекание конвективного облака горизонтальным ветром и заворот потоков на уровне Z= 4 км.

Численные эксперименты, выполненные по различным данным зондирования показали, что характеристики получающегося в модели облака зависят от распределения температуры и влажности в атмосфере и от структуры горизонтального ветра. При неустойчивой стратификации атмосферы и высокой влажности в приземном слое в численных экспериментах получались облака с верхней границей 12 и более км. Верхняя кристаллическая часть вследствие растекания конвективной струи имела форму наковальни, т.е., была вытянута по ветру.

Таким образом, полученные в ходе численных экспериментов по модели параметры облака: высота, скорости вертикальных и горизонтальных воздушных потоков, коэффициенты турбулентной диффузии и другие характеристики удовлетворительно согласуются с известными представлениями и данными наблюдений [87,153].

3.2 Результаты численного исследования микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков

Микроструктурные параметры облаков. В расчетах отмечалось возникновение облака вследствие конденсации водяного пара. Конденсация сопровождается выделением скрытой теплоты парообразования. Воздух находится в состоянии насыщения или незначительного перенасыщения, что является следствием понижения температуры до точки росы. При температуре T водяной пар имеет парциальное давление e, относительное насыщение определяется при этом по формуле $s = \frac{e}{e_s(T)}$. При расчетах определялось соответствующее увеличение относительного насыщения для воды и льда при охлаждении объема воздуха, содержащего некоторое количество водяного пара.

Для определения микроструктурных характеристик образующегося облака рассматриваются микрофизические процессы образования и роста отдельных облачных капелек. В число этих процессов входят диффузия водяного пара, теплопроводность, выделение скрытой теплоты, а также эффекты поверхностного натяжения.

Облачные капли, образующиеся в результате конденсации, имеют довольно узкий диапазон распределения по размерам. В только что образованном тумане они имеют размеры в пределах 10-20 мкм, и в процессе последующего конденсационного роста наблюдается тенденция к сужению этою диапазона [49].

Результаты численного моделирования показывают, что концентрация облачных капелек является функцией скорости охлаждения и спектра облачных ядер конденсации. Быстрое охлаждение вызывает большие временные пересыщения и активирует больше облачных ядер конденсации, чем медленное охлаждение. Поэтому концентрация капелек в основании облака с сильным восходящим потоком превышает концентрацию капелек в

основании облака со слабым восходящим потоком при равенстве остальных параметров. На концентрацию капелек сильнее влияют концентрация и распределение по размерам имеющихся облачных ядер конденсации [49]. Обилие крупных гигроскопических частиц, способных действовать как облачные ядра конденсации, обычно приводит к высокому значению концентрации облачных капелек.

Облака по результатам расчетов состояли на начальной стадии (примерно до 20-й минуты) из капель воды, позднее из смеси капель и кристаллов. При отрицательных температурах воздуха наблюдается смешанное фазовое состояние, при этом капли находятся в переохлажденном состоянии. Процесс замерзания их носит вероятностный характер. Температура воздуха определяет фазовое состояние облачных частиц.

Система облачных частиц в модели детально описывается с помощью статистических функций распределения по массам ($f_1(x, y, z, m, t)$, $f_2(x, y, z, m, t)$, $f_3(x, y, z, m, t)$). Задачей численного моделирования микрофизических процессов является нахождение функций распределения частиц по размерам на интервале времени [0;T], а также величин, определяемых спектрами: концентрации частиц, водности, радиолокационной отражаемости и других [71].

Вопрос о спектрах облачных частиц и частиц осадков в различных частях облака, их концентрации, интегральной водности представляет большой интерес. Поэтому нами исследовались спектры капель и ледяных частиц в разные моменты времени и на разных уровнях. На рисунках 3.6-3.8 приведены изолинии микроструктурные параметры: водность и ледность облака. Можно отметить, что микроструктура облаков неоднородна. Водность и ледность изменяются в мощном кучевом облаке от долей грамма до нескольких грамм в пределах сотен метров. Распределения капель и кристаллов по размерам зачастую широкие и не регулярные, наблюдаются многомодальные спектры. Полученные результаты можно объяснить турбулентным перемешиванием и неоднородностями восходящих потоков. В

облаке работают механизмы, которые стремятся расширить спектр облачных капелек с течением времени.

Наиболее важным процессом, приводящим к осадкам, является гравитационный захват. Электрические эффекты, ускоряют этот процесс при определенных условиях [168,179].

На стадии максимального развития облака (t=40 мин.) максимальная концентрация ледяных частиц имеет место по горизонтали в центре облака (x = 20 км), а по вертикали на уровне z = 7,5 км. В максимуме концентрация равна около 600 $см^{-3}$, водность равна около 10 г $м^{-3}$. Распределение кристаллов по размерам описывается гамма – функцией. По высоте их концентрация увеличивается с уменьшением температуры, т.к. возрастает вероятность замерзания переохлажденных капель.

Результаты численного моделирования согласуются с данными наблюдений. В работе [82] представлены данные измерений максимальных размеров и концентрации капель в верхней трети облака с наибольшей мощностью $_{\Delta}H$ =5 км. Концентрации капель размером более 100 мкм достигают $6 \cdot 10^3 \div 7 \cdot 10^3$ $м^3$, максимальный размер был R= 1000 мкм. В этих случаях зондировка проводилась в правой тыловой части облака по ходу его движения. Правая тыловая часть в большинстве облаков характеризуется и самыми крупными зонами упорядоченных нисходящих движений.

Превращение мощных кучевых облаков в кучево-дождевые сопровождается такими явлениями, как оледенение вершин облаков, выпадение из них крупнокапельных ливневых осадков, иногда града, а также появление в наиболее развитых по вертикали и горизонтали кучево-дождевых облаках значительных объемных электрических зарядов, в результате которых возникает молния и облака становятся грозовыми [87,105,168].

Некоторые результаты численного моделирования грозовых облаков представлены в работах [119,132,135,155,171,260,262,263].

По данным аэрологического зондирования атмосферы (07.06.2012) получена следующая картина: примерно к 40-й минуте облако достигает

стадии максимального развития, образовались жидкие и твёрдые осадки. На рисунке 3.6 представлены вертикальные и горизонтальные потоки в зоне облака в момент времени t = 40 мин.

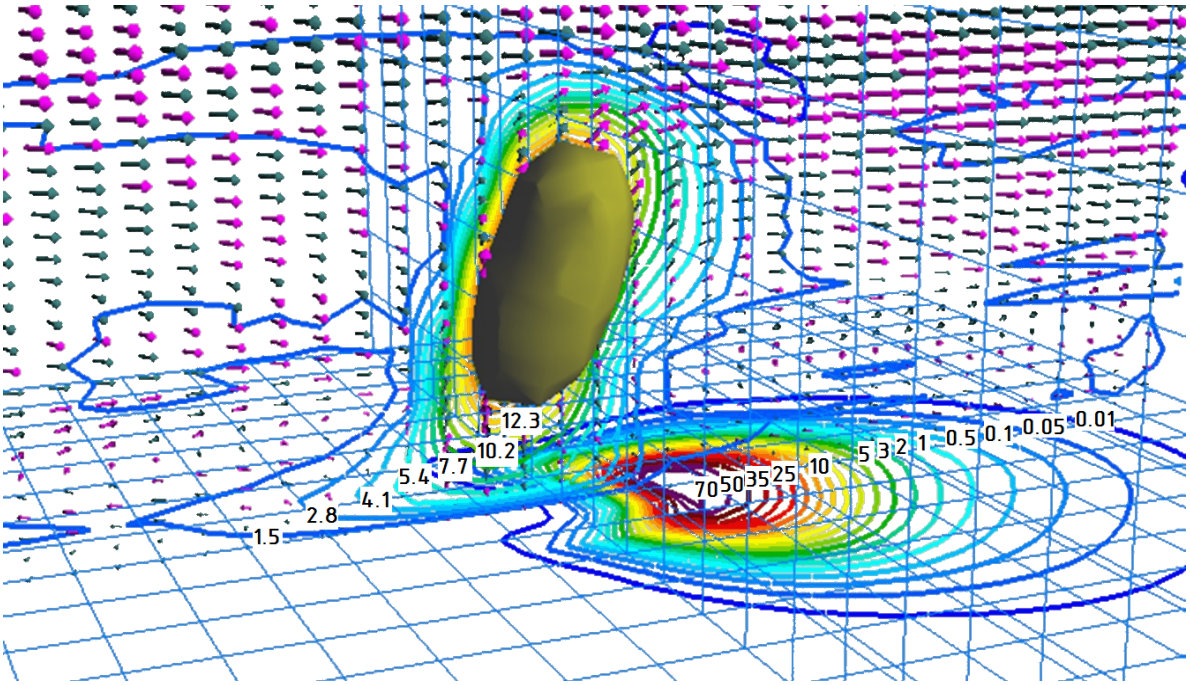


Рисунок 3.6 - Строение мощного конвективного облака в момент времени t = 40 мин. На рисунке приведены: потоки воздуха в вертикальной плоскости, пересекающей облако (векторное поле); изоповерхность мощного восходящего потока, отвечающая скорости *w* = 15,6 м/с (трёхмерная поверхность в центре рисунка); изолинии вертикальной скорости выражены в м/с; изолинии интенсивности осадков у поверхности земли (в горизонтальной плоскости, на уровне 1 км) в мм/час. Ячейки горизонтальной и вертикальной сеток на рисунке имеют размер 2x2 км.

Максимальная скорость восходящего потока Wm = 29 м/с отмечается на уровне z = 6000 м, скорость нисходящего потока равна -3,2 м/с. Столб восходящего потока (на рисунке приведена изоповерхность W = 15,6 м/с) имеет небольшой наклон по направлению горизонтального потока воздуха.

Осадки образуются в верхней части восходящего потока, затем происходит их дальнейший рост и выпадение в стороне (впереди и левее) от

восходящего потока. Интенсивность осадков в момент времени 40 мин также представлена на рисунке 3.6. Отображена трехмерная область с сеткой на нижней горизонтальной поверхности и изолинии интенсивности осадков на уровне z=1 км с нанесенными числовыми значениями, выраженными в мм/час.

По данным аэрологического зондирования атмосферы в численных экспериментах получены микроструктурные параметры облака, которые приведены на рисунке 3.7.

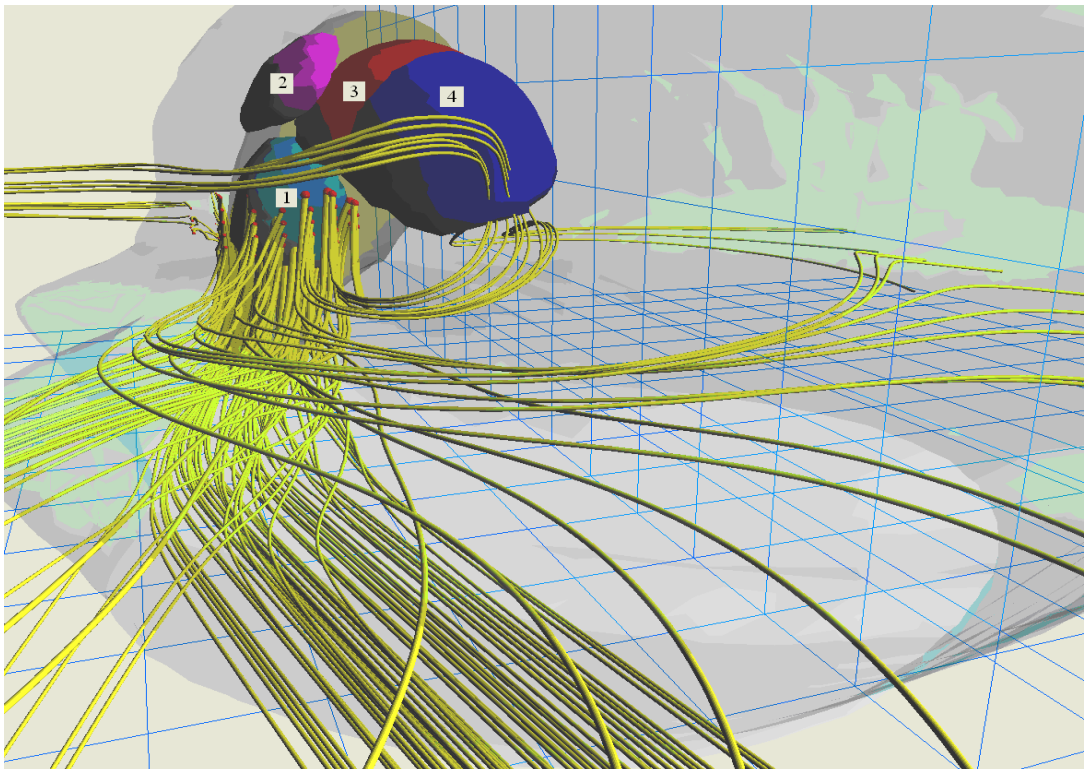


Рисунок 3.7 - Микроструктура облака на 30-й минуте.

С помощью разработанных средств визуализации были определены потоки, питающие мощное облако в квазистационарной стадии. В наблюдаемом на рисунке 3.7 облаке имел место вток из подветренной области на уровне 3-4 км, справа от направления ведущего потока (уровень 0-0.5 км), с наветренной стороны справа от облака под углом 30-60 ^{o} (уровень 3 км). Отмечалась рециркуляция крупных ледяных частиц от области 4 к области 1.

Характеристики облака быстро возрастают, облако за 10 минут достигает мощного состояния, такое облако дает при дальнейшем развитии ливень и град.

Пример эволюции облака по данным зондирования 29.05.2013 приведен на рисунке 3.8 (а,б,в). Начальная стадия развития облачных ячеек характеризуется малоподвижностью, изменением центра максимальной радиолокационной отражаемости, тенденцией роста объема радиоэха, что свидетельствует о локализации восходящих потоков в зоне роста радиоэха [153]. В этой стадии в подоблачном слое формируются только восходящие потоки, максимальное значение которых локализуется в области повышенного радиоэха, соответствующей области накопления водно-кристаллической массы. Очевидно, что количество аккумулированной в облаке воды, также как и размер выпадающего града, определяется скоростью восходящих движений.

Скорость вертикального развития может составлять от 10 до 40 м/с, поэтому верхняя граница образуемого кучево-дождевого облака даже в местной воздушной массе может достигать 8 и более километров над поверхностью земли. То есть, уже в течение примерно 7-10 минут кучевое облако может разрастись до высот порядка 8 км и превратиться в кучево-дождевое облако Cb. Максимальные значения восходящих скоростей в мощном градовом облаке достигают $w = 30–40$ м/с. Формирование града зависит от скорости восходящих потоков в конвективном облаке.

В растущем облаке значения вертикальной компоненты скорости характеризуются большой пространственной изменчивостью, основной внутриоблачный восходящий поток содержит внутри себя локальные объемы с повышенными ее значениями.

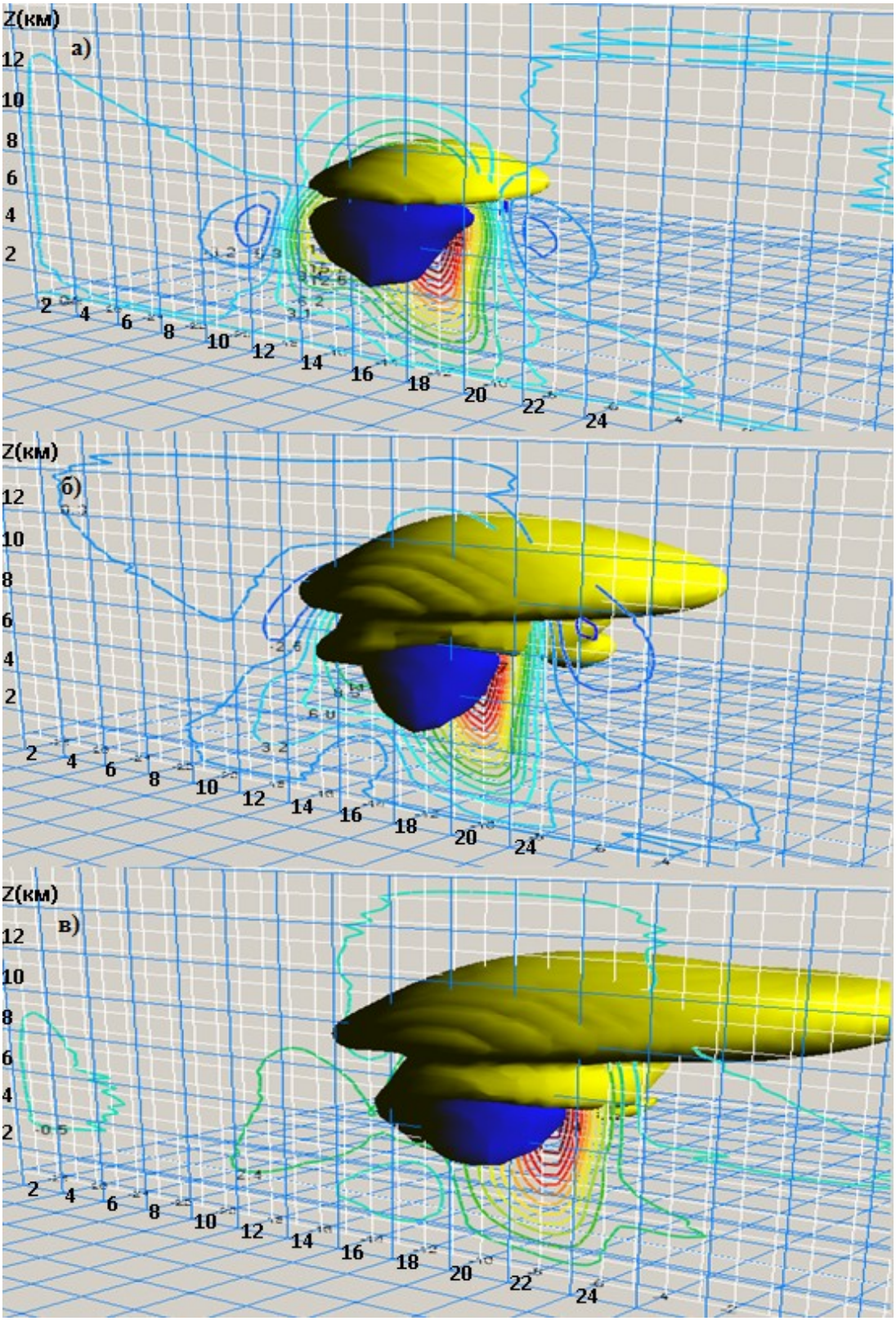


Рисунок 3.8 – Изоповерхности водности (синий) крупные капли и ледности (желтый) ледяные частицы в последовательные моменты времени: (а) - 20 мин, (б) - 30 мин, (в) - 40 мин. Вспомогательная сетка 2х2 км.

В мощных кучево-дождевых облаках восходящие потоки носят квазиламинарный характер, достигают высоты 8-10км и локализуются во фронтальной части облака [194]. В численных экспериментах исследовались изолинии скорости восходящих и нисходящих потоков в облаке на 20 - 40 минутах развития. Наблюдалась скорость восходящих потоков до 40 м/с, локализация потока соответствует приведенному выше описанию.

Компенсирующий нисходящий поток, инициированный законом сохранения массы, возникает вокруг облака. Из-за большой площади компенсационных движений нисходящие потоки меньше восходящих на порядок. Практически во всех вариантах моделирования конвективных облаков, которых выполнено несколько десятков, отмечались нисходящие потоки и вихрь перед облаком. С наветренной стороны он усиливается внешним ветром, за облаком может быть слабее, т.к., за облаком возникает гидродинамическая тень.

Примерно к 40-й минуте облако достигает стадии максимального развития, появляются частицы жидких и твёрдых осадков. Максимальная скорость восходящего потока Wm = 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 3.9. На рисунке 3.9.а изображены изолинии водности, на рисунке 3.9.б. приведены изолинии ледности.

Для более глубокого понимания процессов, происходящих в мощных конвективных облаках, были проведены массовые численные эксперименты по разработанной модели.

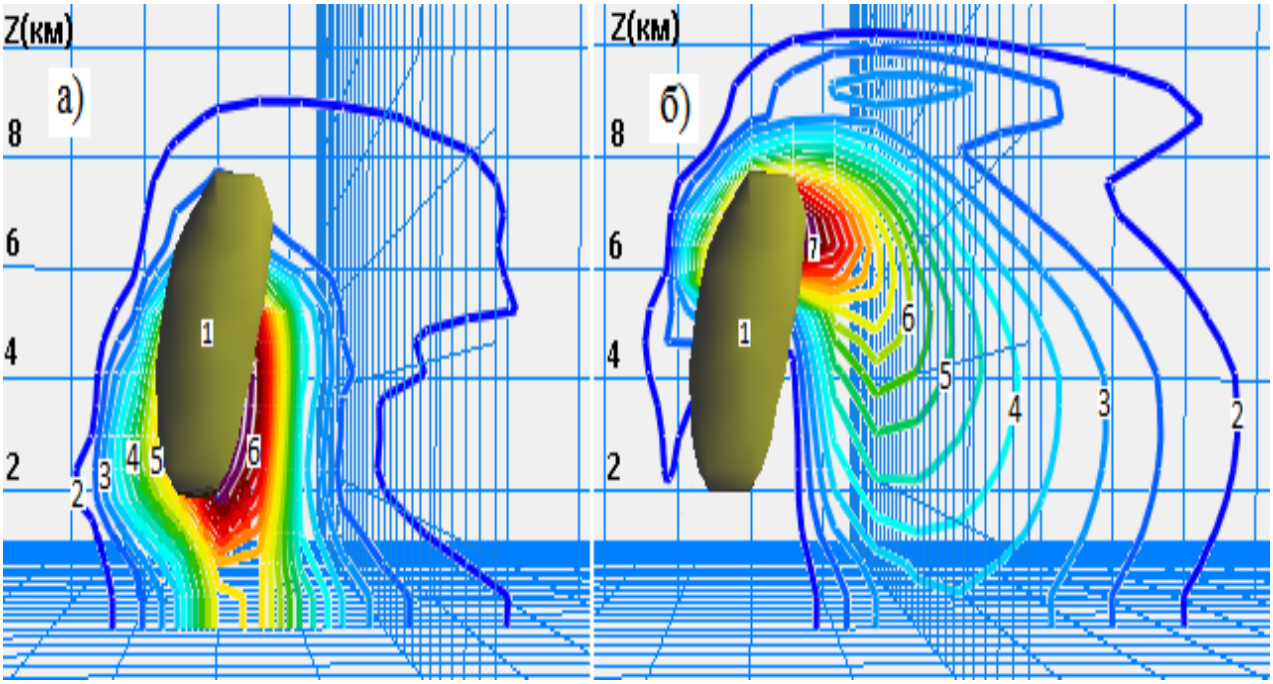
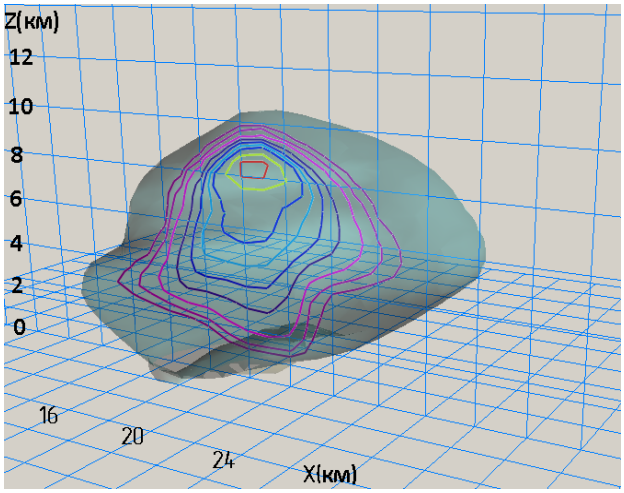


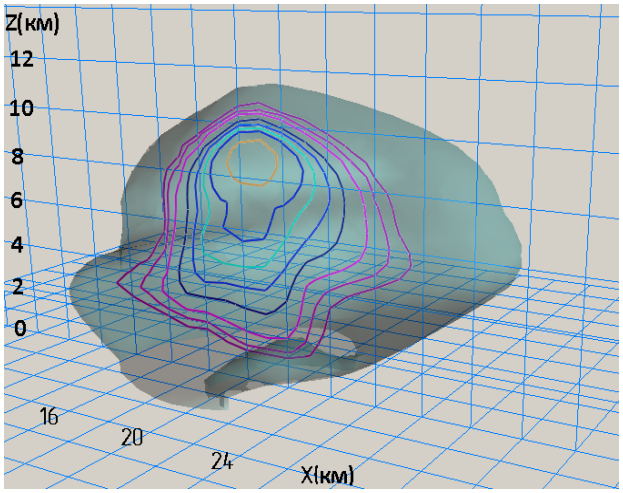
Рисунок 3.9 – Изолинии водности (а) и лёдности (б) на 40-й минуте развития облака и изоповерхность w=10 м/с (1): 2: $q_в$=1,6 г/м^3; 3: $q_в$=3,4 г/м^3; 4: $q_в$=4,2 г/м^3; 5: $q_в$=6,1 г/м^3; 6: $q_в$=9,95 г/м^3 – максимум водности; 2: $q_л$=0,2 г/м^3; 3: $q_л$=0,8 г/м^3; 4: $q_л$=1,2 г/м^3; 5: $q_л$=1,5 г/м^3; 6: $q_л$=1,8 г/м^3; 7: $q_л$=3,80 г/м^3 – максимум ледности.

В большей степени внимание при анализе результатов моделирования уделялось таким параметрам, как: водность, ледность, радиолокационная отражаемость, заряд частиц, потенциал и напряженность электростатического поля. Некоторые результаты расчетов представлены на рисунках 3.10-3.12.

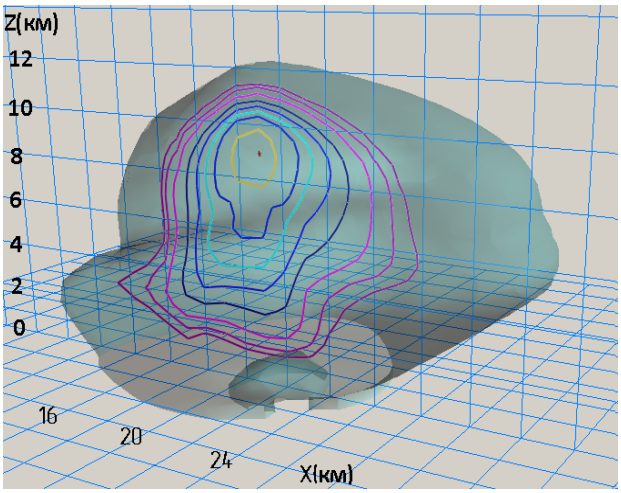
На рисунке 3.10 (а,б,в,г) приведена структура облака по параметру влагосодержание (сумма водности и ледности) в последовательные моменты времени через 3,5 мин. Расчеты выполнены по данным зондирования за 02.09.2010. Также изображена радиолокационная отражаемость 10 dBZ, она выведена полупрозрачной изоповерхностью для возможности просмотра изолиний других параметров внутри облака. Отмечается рост влагосодержания до максимального значения около 15 г/м^3.



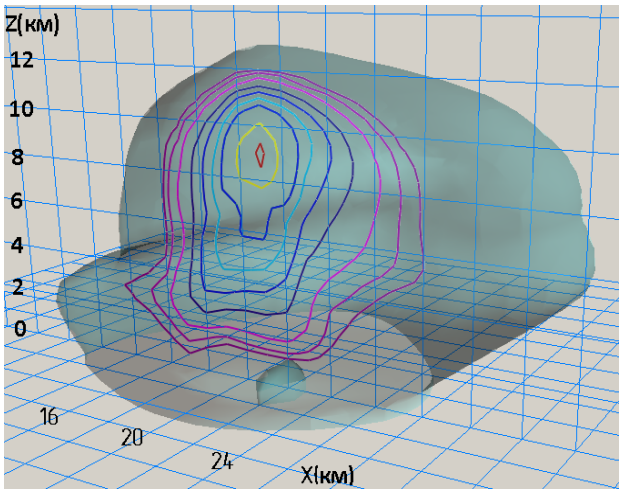
а)



б)



в)



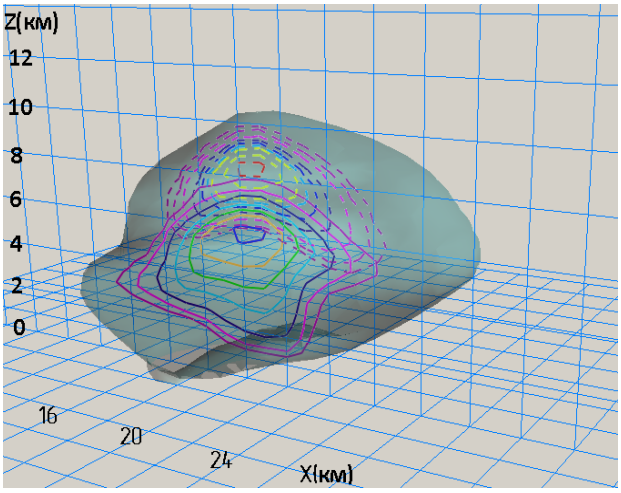
г)

Рисунок 3.10 - Изолинии суммарного содержания влаги в конденсированном состоянии в вертикальной плоскости, проходящей через облако, на фоне изоповерхности радиолокационной отражаемости Z= 10 дБZ, в моменты времени а) t=30 мин б) t=33,5 мин в) t=37 мин г) t=40,5 мин. Изолинии влагосодержания имеют значения (в порядке от внешнего контура к центру): 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15 г/м^3.

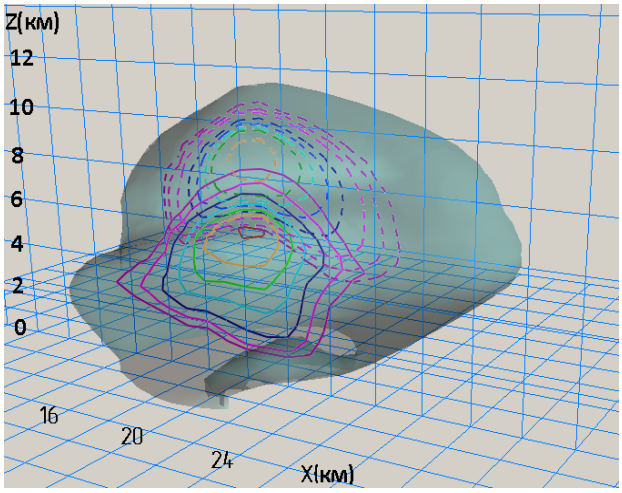
На рисунках 3.11 (а,б,в,г) приведены изолинии водности и ледности для четырех моментов времени. С течением времени в облаке накапливается большое (более 10 г/м^3) количество влаги, происходит укрупнение облачных частиц, более тяжелые объемы облачного воздуха начинают опускаться вниз, увлекаясь массой накопленной жидкокапельной влаги, кристаллов и града. Накопление влаги происходит наиболее интенсивно на высотах, где температура воздуха составляет -10 °С и ниже, и восходящие потоки воздуха достигают максимальных скоростей. На рисунках 3.11 (в,г) приведены области сосредоточения крупнокапельной фракции и область формирования крупных ледяных частиц на стадии развития облака. Также приведена полупрозрачной изоповерхность радиолокационной отражаемости 10 dBZ, максимальная отражаемость составляла для момента t=40,5 мин времени 63 dBZ.

На стадии зрелости кучево-дождевое облако достигает своего максимального вертикального развития, как бы упираясь в «запирающий» слой более стабильного воздуха или тропопаузу. Поэтому на смену вертикальному развитию, вершина облака начинает растекаться в горизонтальном направлении. Появляется так называемая «наковальня», представляющая собой перистые облака, состоящие из ледяных кристаллов (рисунок 3.8).

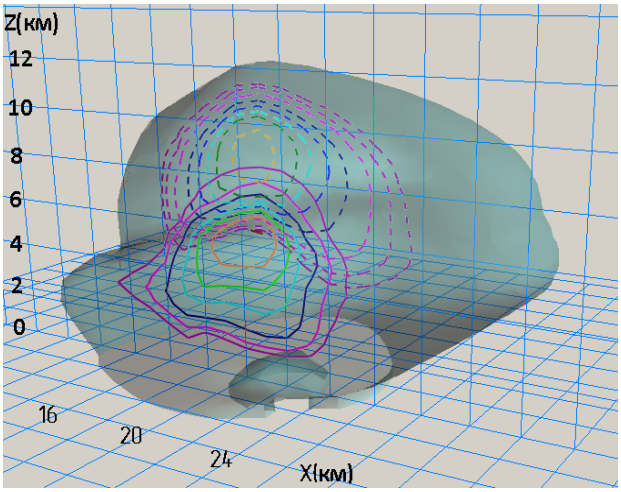
В облаке конвективные потоки формируют восходящие потоки воздуха, а осадки вызывают нисходящие потоки, перед осадками в приземном слое распространяется фронт порывов (gust front) [193]. Изолинии ледности на 40-й минуте приведены на рисунке 3.12.



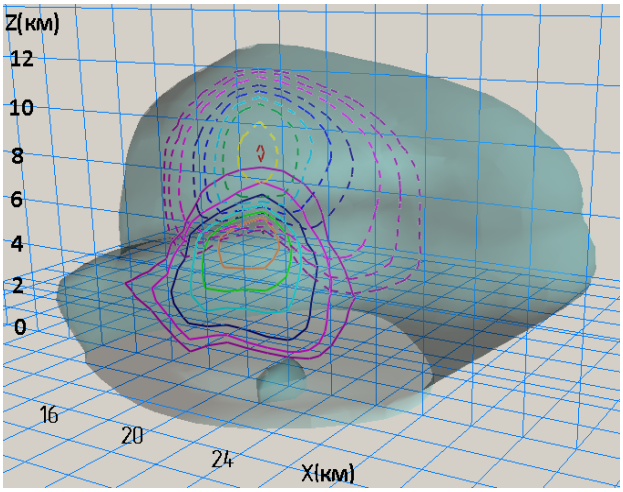
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.11 - Изолинии водности (сплошные линии) и ледности (пунктирные линии) в вертикальной плоскости, проходящей через облако, на фоне изоповерхности радиолокационной отражаемости Z= 10 дБZ, в моменты времени а) t=30 мин б) t=33,5 мин в) t=37 мин г) t=40,5 мин. Изолинии водности и ледности имеют значения (в порядке от внешнего контура к центру): 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10 г/м^3.

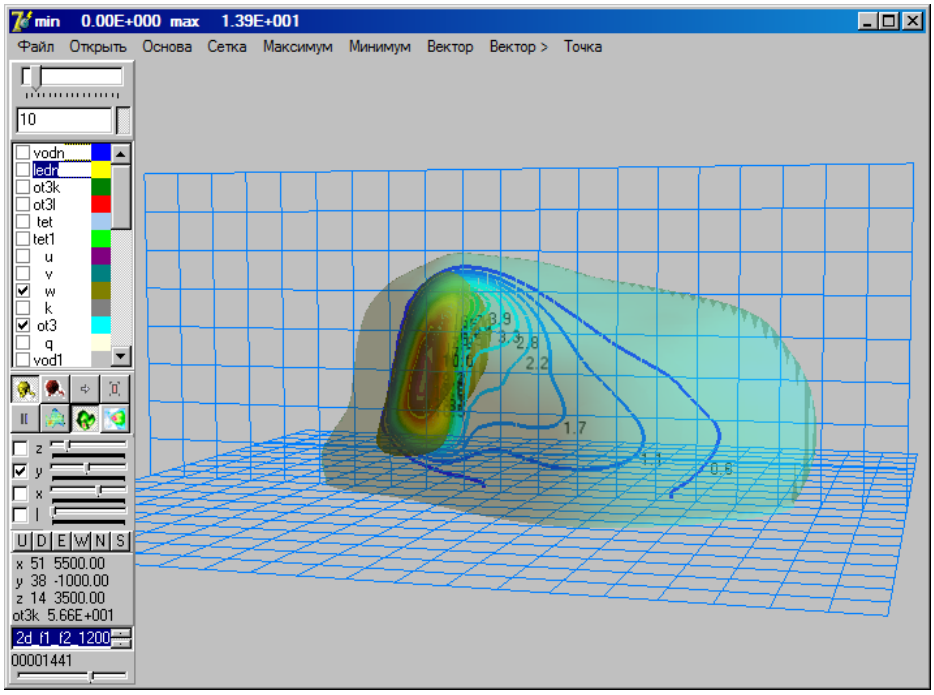


Рисунок 3.12 –Ледность на 40-й минуте, г/м^3;

Кроме мелкомасштабной турбулентности на границе облака, под облаком и с подветренной его стороны развивается крупномасштабная турбулентность. Полученные в численных экспериментах значения коэффициента турбулентной диффузии составляли от 100 до 1000 м^2/сек и более.

При моделировании конвективных процессов одними из расчетных параметров являются радиолокационные отражаемости облачных частиц на длинах волн (3, 5, 10 см). Наравне с другими параметрами проводился анализ радиолокационной отражаемости модельных облаков. При расчетах наблюдалась отражаемость до 60 dBZ и более, что соответствует наличию среднего града в облаке [109]. Кроме того, эти параметры использовались для сравнения с отражаемостью реальных облаков, наблюдаемых с помощью радиолокаторов МРЛ-5 и ДМРЛ-С.

Структура ветра в атмосфере оказывает существенное влияние на формирование области локализации водности в облаке. При этом оно становится слабее с повышением водности в этой зоне. На положение и форму зоны максимального значения 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 этой зоне, а на положение и форму зоны повышенных значений ледности его влияние менее выражено [22,31].

Важным следствием влияния ветра в атмосфере на формирование макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков является то, что в результате зона выпадения осадков и зона восходящих потоков становятся разнесенными в пространстве. Отсюда следует вывод, что концепция воздействия на конвективные облака путем стимулирования осадков из них и подавления с их помощью восходящих потоков может быть нереализуемой.

Характеристики облака в одной и той же синоптической ситуации при наличии разворота горизонтального ветра и без него оказываются различными: в отсутствии разворота ветра с высотой имело место усиление параметров облака.

Электрические параметры облаков. Накопление электрического заряда в облаках связано с процессами замерзания капель и взаимодействия капель и кристаллов. В частности, при резком замерзании переохлажденных облачных капель или намерзании их на поверхности частичек крупы и града образуются мелкие ледяные осколки – продукты замерзания, которые имеют преимущественно положительный заряд. Вследствие разности скоростей гравитационного падения мелких ледяных кристаллов, заряжающихся при взрыве положительно, и более крупных частиц, крупы или града, заряжающихся преимущественно отрицательно, происходит пространственное разделение зарядов. В предвершинной части облака формируется положительный объемный заряд, ниже – отрицательный.

На каждом временном шаге численно решалось уравнение для потенциала электрического поля (2.6). Рассчитывались вертикальная и горизонтальные составляющие напряженности электрического поля в вольтах

на сантиметр. Результаты по исследованию эволюции электрических характеристик облака представлены на рисунках 3.13 - 3.15.

Электрическое строение облака (пространственное распределение суммарного объемного заряда в облаке) на 35-й минуте развития представлено на рисунке 3.13. Суммарный положительный заряд в единице объема достигает значений порядка 10^{-9} Кл/м^3, потенциал достигает $8 \cdot 10^8$ В. Компоненты напряженности поля имеют значения $E_x \approx 1200$ В/см, $E_z \approx 2000$ В/см.

С течением времени заряд в облаке, и соответственно потенциал поля, увеличиваются.

На приведенных в параграфе рисунках отображается вспомогательная сетка, которая имеет ячейки 2х2 км. Сетка изображена в вертикальной (XOZ) и горизонтальной (XOY) плоскостях.

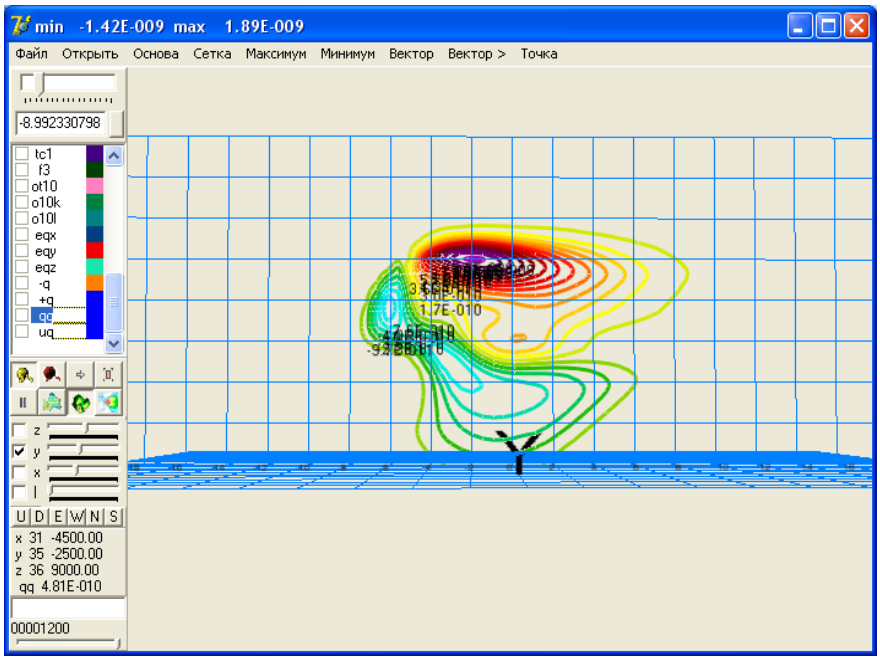


Рисунок 3.13 - Распределение объемных зарядов в облаке на 35-й минуте развития, Кл/м^3.

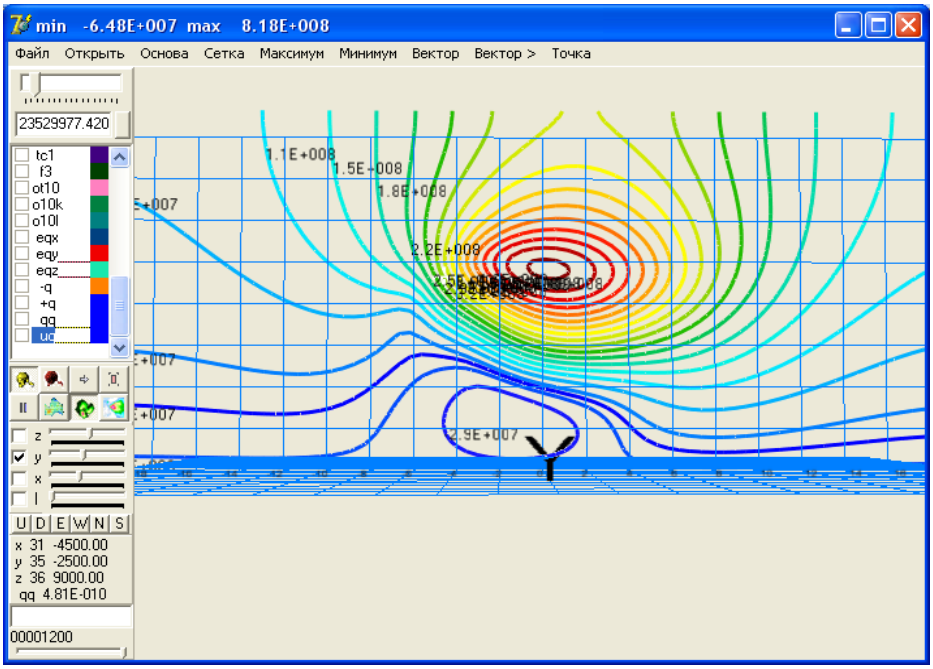


Рисунок 3.14 - Потенциал в облаке на 35-й минуте развития, В.

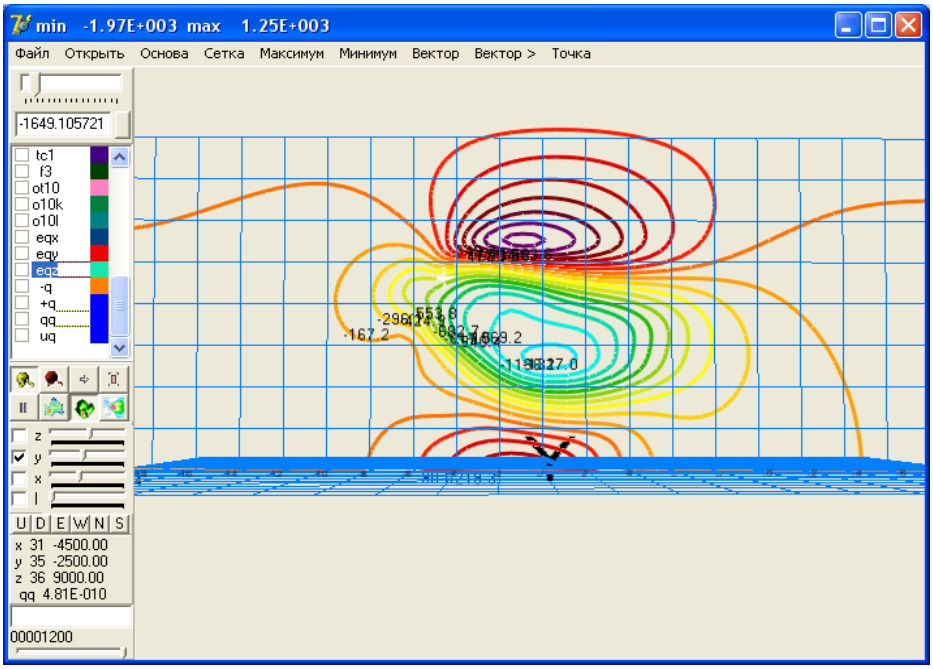


Рисунок 3.15 – Напряженность E_z электростатического поля, В/см.

По данным зондирования 27.05.2014 микроструктурные и электрические параметры в момент времени t = 40 мин приведены на рисунке 3.16. Представлены: изоповерхность скорости восходящего потока W = 15,6 м/с (1), изоповерхность лёдности 2 г/м^3 (2), область положительного объемного заряда (3), который сосредоточен на осколках замерзания капель. Область

положительного объемного заряда находится в верхней части облака и имеет вид вытянутого по ветру относительно тонкого слоя — «наковальни». Максимальная плотность положительного объёмного заряда в «наковальне» составляет $2{,}4 \cdot 10^{-9}$ Кл/м^3.

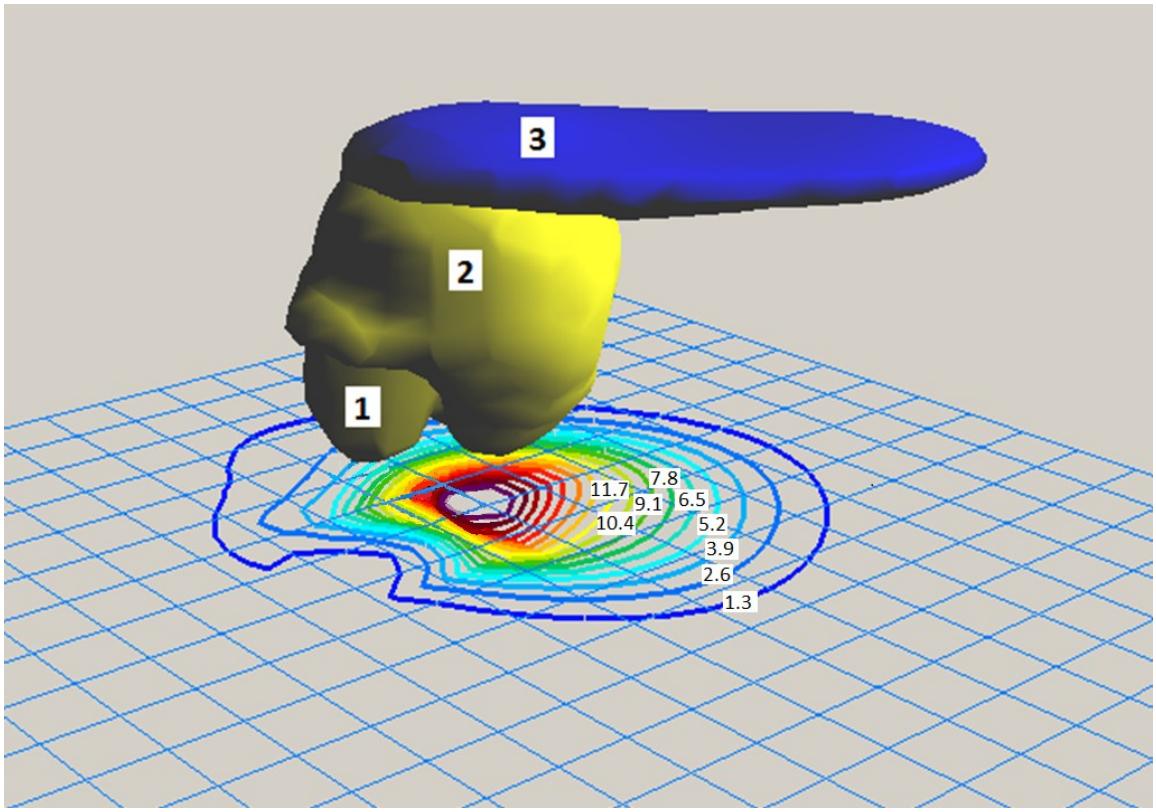


Рисунок 3.16 - Изоповерхность плотности положительного объёмного заряда (3) в момент времени t=40 мин, соответствующая значению плотности $1{,}6 \cdot 10^{-9}$ Кл/м^3, область вытянута в форме «наковальни». Приведены также изоповерхность скорости восходящего потока W = 15 м/с (1) и изоповерхность лёдности, соответствующая значению 2 г/м^3 (2). В горизонтальной плоскости на уровне поверхности земли приведены изолинии вертикально интегрированной водности (VIL), кг/м^2. Шаг вспомогательной сетки 2х2 км.

Максимальный электрический потенциал, полученный в расчётах, составлял более $2 \cdot 10^9$ В, что согласуется с результатами, полученными в работе [254]. Максимум потенциала находился в верхней фронтальной части

облака в районе «наковальни». Область максимума потенциала находится на 5÷10 км впереди зоны осадков. Максимальное значение вертикальной составляющей напряжённости электростатического поля на 40-й минуте составляло 2000 ÷ 2300 В/см, что близко к пробивному напряжению в облачной среде.

Напряженность поля приведена на рис 3.17. Отмечается три полюса [61,62,278]. В мощных конвективных облаках, превышающих по высоте изотерму -22 ^{o}C, возникают объемные электрические заряды большой величины (до нескольких Кулон). Обычно верхняя часть облака заряжена положительно, средняя – отрицательно, нижняя часть облака заряжена положительно [94,221,278].

На рисунке 3.18 приведены поля вертикальной составляющей напряженности электрического поля для трех моментов времени (20, 30 и 40 минут).

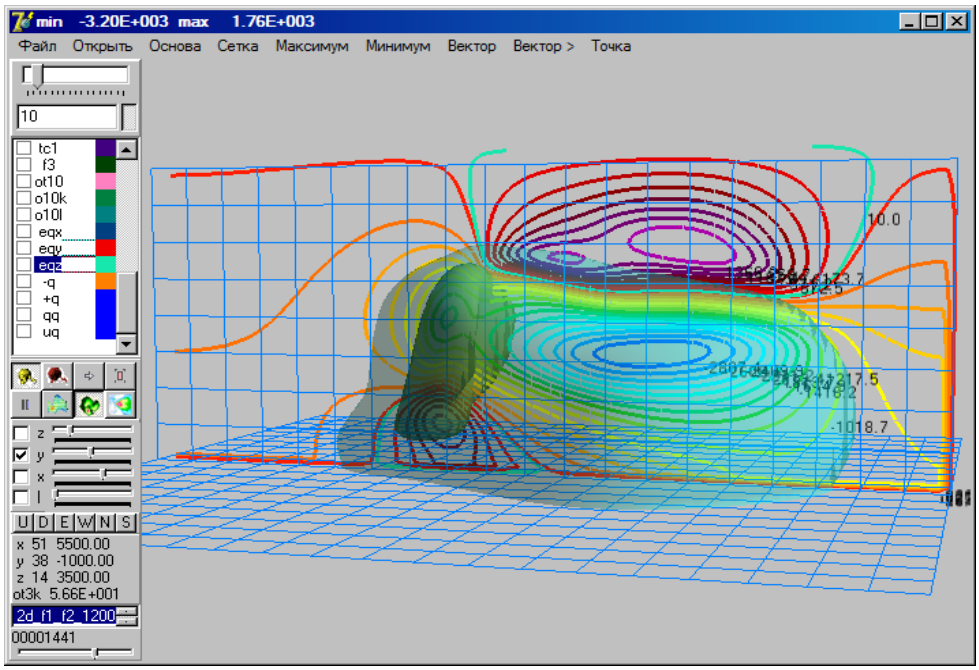


Рисунок 3.17 - Поле вертикальной составляющей напряженности электростатического поля на 40-й минуте.

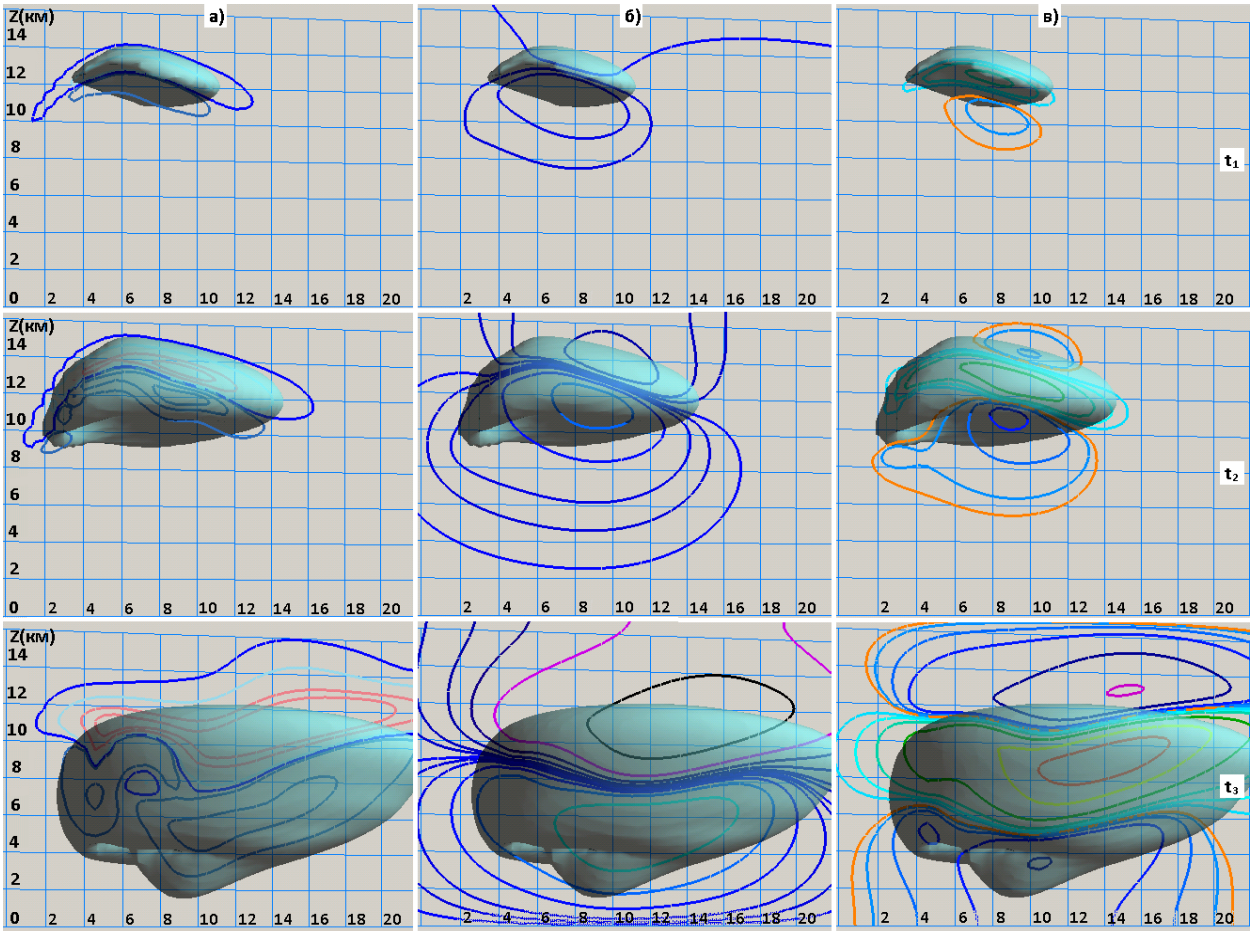
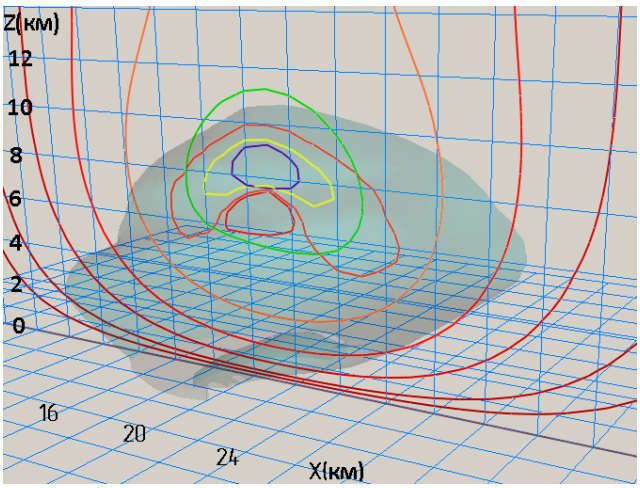
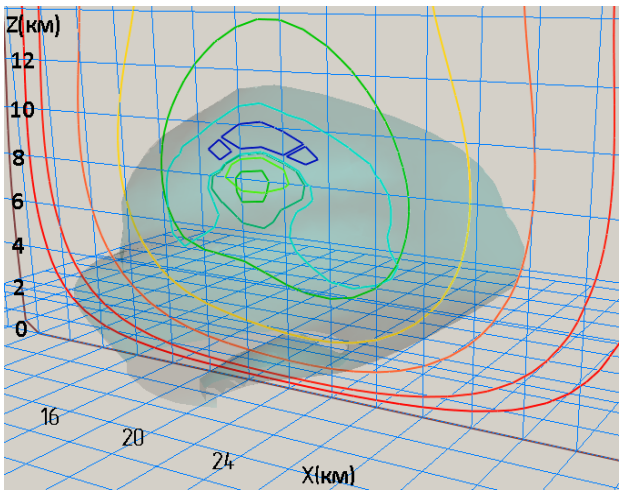


Рисунок 3.18 – Объемный заряд (а), потенциал (б) и напряженность поля (в) в облаке для трех моментов времени (t_1=20, t_2=30, t_3=40 мин)

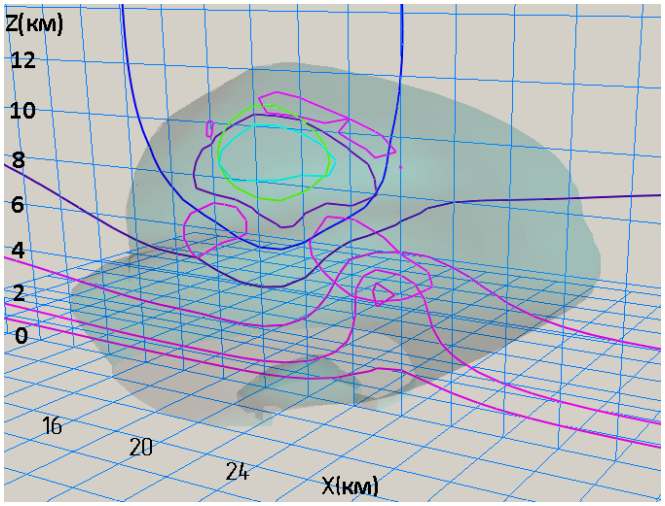
На рисунке 3.19-3.20 приведены изолинии электрических параметров облака на стадии роста и максимального развития (30-40 минуты).



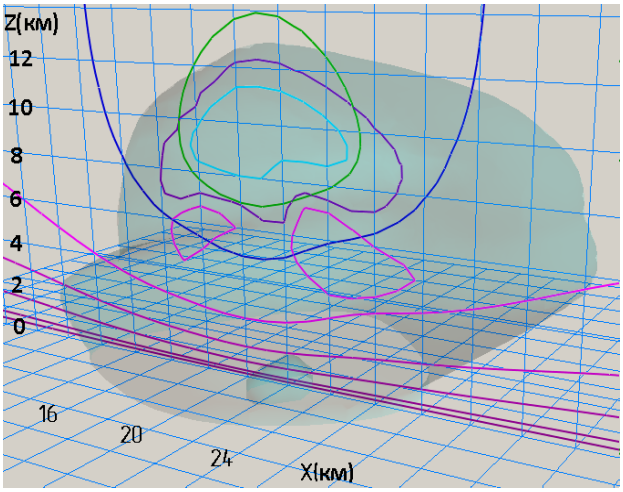
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.19 - 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: $-2.0\cdot10^{-9}$, $-1.0\cdot10^{-9}$, $-1.0\cdot10^{-10}$, $1.0\cdot10^{-10}$, $1.0\cdot10^{-9}$, $2.0\cdot10^{-9}$ Кл/м^3. Изолинии потенциала (в порядке от внешнего контура к центру): $-5.0\cdot10^{8}$, $-2.5\cdot10^{8}$, $-1.0\cdot10^{8}$, $-5\cdot10^{7}$, $-2.5\cdot10^{7}$, $-1.0\cdot10^{7}$, $-5.0\cdot10^{6}$, $5.0\cdot10^{6}$, $1.0\cdot10^{7}$, $2.5\cdot10^{7}$, $5.0\cdot10^{7}$, $1.0\cdot10^{8}$, $2.5\cdot10^{8}$, $5.0\cdot10^{8}$ В.

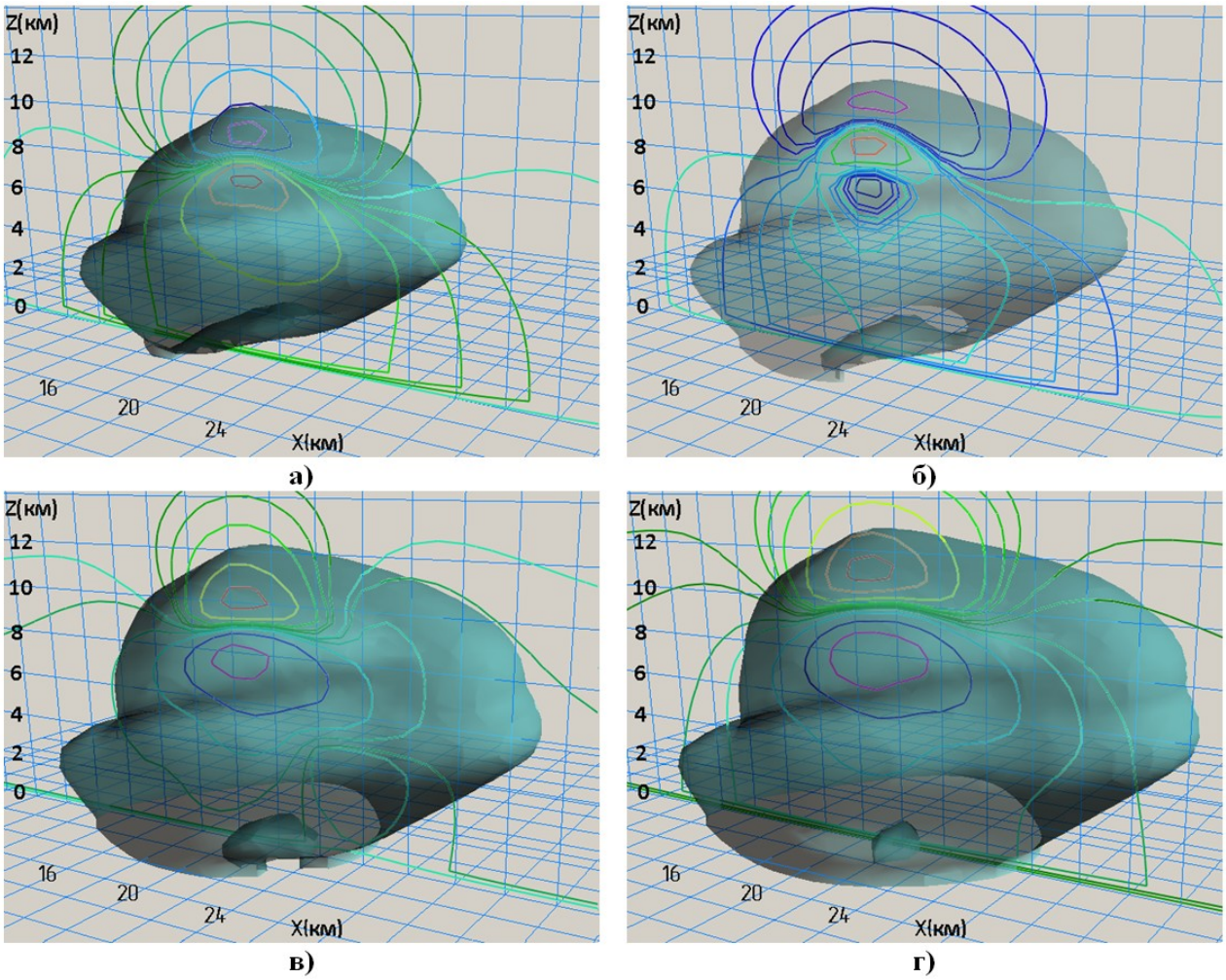


Рисунок 3.20 - Изолинии вертикальной составляющей напряженности поля в вертикальной плоскости, проходящей через облако, на фоне изоповерхности радиолокационной отражаемости Z= 10 дБZ, в моменты времени: а) t=30 мин, б) t=33,5 мин, в) t=37 мин, г) t=40,5 мин. Изолинии вертикальной составляющей напряженности поля: -2000, -1500, -1000, -500, -200, -100, -50, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 В/см.

Формирование электрических зарядов и поля в модельном облаке происходило вследствие замерзания капель и аккреции (взаимодействия капель и 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 скапливается положительный объёмный заряд, в

средней части облака — отрицательный. Плотность положительного и отрицательного объемных зарядов достигала $2\ 10^{-9} – 3\ 10^{-9}$ Кл/м^3, (разумеется, с учетом знака заряда). В численных экспериментах на каждом шаге по времени вычислялись потенциал и напряженность поля. Электрический потенциал на стадии роста составлял величину от $0{,}8 \cdot 10^9$ до $1{,}5\ 10^9$ В. Компоненты E_x, E_y напряжённости поля составляли около 1500 В/см, а E_z 1500-2300 В/см.

По результатам моделирования исследовано пространственное распределение положительного, отрицательного и суммарного объёмных зарядов в облаке в различные моменты времени.

Результаты расчетов напряженности электрического поля находятся в согласии с экспериментальными измерениями, проведенными в ВГИ [85], согласно которым в облаках имеются достаточно большие области со значениями Е порядка 1000 В/см. В этой же работе указывается на наличие нескольких областей с различными направлениями поля.

По результатам моделирования электрических характеристик можно предположить, что механизм спонтанной кристаллизации крупных переохлажденных капель и рост градин за счет аккреции являются одними из ключевых физических процессов электризации конвективных облаков на стадии роста и максимального развития.

3.3 Исследование образования осадков в конвективных облаках с учетом электрических явлений

Рассчитанные в каждый момент времени в узлах пространственной сетки значения напряженности электрического поля учитывались при расчете коэффициента коагуляции капель и кристаллов E(R,r), согласно изложенной выше методике.

Исследовано большое число процессов, в которых электрические силы оказывают влияние на развитие частиц [62,87,94]. Заряды на каплях радиусом

меньше 10^{-6} см влияют на конденсацию пара на них. В сильных электрических полях капли могут вытягиваться и разрушаться, под действием электрических сил меняются условия столкновения и слияния частиц облаков и осадков, под влиянием электрических сил на частицах наблюдается усиленный рост инея, электрические силы в какой-то мере влияют на вероятности замерзания капель. Качественные оценки показывают, что электрические явления влияют на продолжительность пребывания капли в облаке и тем способствуют ее росту; частицы заряжающиеся вблизи молниевого канала и разнесенные по объему облака, могут способствовать очень быстрому росту капель в облаке.

Численные эксперименты с учетом влияния электрического поля на скорость коагуляции облачных частиц показали, что в последнем случае осадки образуются быстрее, примерно на 10 минут. Заметное влияние электрические поля оказывают на формирование микроструктуры, когда их напряженность достигает значений порядка 50 В/см.

Между микрофизическими, термодинамическими и электрическими процессами существует обратная связь (взаимодействие), которая заключается во взаимном влиянии их друг на друга. В проведенных численных экспериментах получалось, что электрическое поле ускоряет рост частиц, с другой стороны при этом генерировалось большее количество электрического заряда, которое увеличивало само поле. Общая картина влияния электрического поля проявлялась в некотором ускорении прохождения облаком всех стадий развития, кроме начальной.

Выполненные численные эксперименты с различными данными зондирования показали, что в мощных облаках заряд на ледяных частицах существенно увеличивает их эффективное сечение, поэтому в грозо-градовых облаках наблюдается такой быстрый рост града (по экспериментальным данным время от момента зарождения до выпадения града составляет 6-8 мин. [2]).

Влияние электрической коагуляции является наиболее значительным в развитом облаке с сильными электрическими полями. Это влияние

необходимо учитывать в мощных грозоградовых облаках, находящихся в стадии максимального развития (квазистационарная стадия) длительное время (час и более). В облаках незначительной мощности не имеющих переохлажденной части влияние электрических явлений на рост частиц незначительно. Но, если облако выходит на грозовую стадию, появляются мощные электрические поля, появляются разряды, учет процессов электрической коагуляции обязателен, иначе картина роста частиц в облаке искажается.

Формирование осадков в облаке происходит при наличии в облаке достаточно крупных частиц (r>50мкм), называемых зародышами осадков. Зародыши крупных капель не могут образоваться только в результате конденсации. Из уравнения конденсационного роста капель следует, что для того, чтобы облачная капелька диаметром 40 мкм достигла 200 мкм только за счет конденсации при относительном насыщении в воздухе, равном 1,01, потребуется несколько часов. Это слишком медленный процесс, чтобы объяснить образование дождя во многих конвективных облаках через 20-40 мин после первоначального образования облаков [49].

Существуют два источника зародышей осадков. Первым является коагуляция жидких облачных капелек, вторым - рост крупных ледяных кристаллов в результате осаждения на них водяного пара в смешанных облаках, что происходит из-за значительного пересыщения по отношению ко льду, которое возникает в таких облаках.

За счет присутствия ледяных кристаллов содержание жидкой воды в облаке, естественно, сокращается. Если запасы имеющейся переохлажденной воды не пополняются вследствие дальнейшего охлаждения воздуха, вызываемого подъемом в восходящем потоке конвективного облака, то смешанные капельно-кристаллические облака по мере испарения водяных капелек и осаждения водяного пара на ледяных кристаллах стремятся превратиться в кристаллические.

Следует отметить следующее: мокрые снежинки при температуре около 0 ^{0}C стремятся образовать крупные агрегаты. Дождевые капли, образующиеся в результате таяния твердых гидрометеоров, как правило, бывают крупнее капель, образующихся в результате коагуляции [49].

Расчеты коагуляционного роста отдельных капель в облаке при значениях водности 1 гм$^{-3}$ показывают, что капля диаметром 100 мкм может дорасти до типичного размера дождевой капли (d=1мм) приблизительно за 5 мин. Этот расчет показывает, что осадки достаточно быстро образуются в облаках со значительной концентрацией жидкой воды и при условии, что в них имеется какое-то количество крупных капель или кристаллов. Большая часть времени при образовании осадков в облаке уходит на рост частиц до диаметра 100 мкм. Это связано с тем, что коэффициент взаимодействия мелких частиц очень маленький. По экспериментальным данным он составляет от 0,001 до 0,01. Как было отмечено выше, в присутствии электрического поля и зарядов на каплях этот коэффициент значительно возрастает и может превышать 1 [77,80,210].

Для оценки влияние электрического поля на коагуляцию облачных частиц в данной работе были проведены численные эксперименты по моделированию образования осадков в пространственно однородной системе при наличии электрических полей различной интенсивности. Коэффициент коагуляции аппроксимировался в зависимости от напряженности электрического поля E_z по данным Красногорской и Левина [77,78,80,81]. Результаты расчетов представлены на рисунках 3.21-3.22.

На рисунке 3.21 представлена зависимость хода процесса коагуляции капель при различных значениях напряженности электрического поля в облаке. По оси ординат отложена водность по градациям радиусов (г/м^3).

С увеличением напряженности поля быстрее образуются зародыши осадков и спектр смещается в сторону крупных капель.

Из первоначального спектра (кривая 1 на рисунке 3.22) образуются дождевые капли при отсутствии поля за 35 мин. (кривая 2 на рисунке 3.22), а

при напряженности E_z=1000 В/см дождь образуется за 23 минуты, при этом формируется спектр, близкий к кривой 2, но мелкокапельная часть спектра поглощается практически полностью. Таким образом, процесс осадкообразования сокращается в присутствии электрических полей приблизительно на одну треть общего времени образования осадков. При больших значениях E_z влияние поля становится еще существеннее.

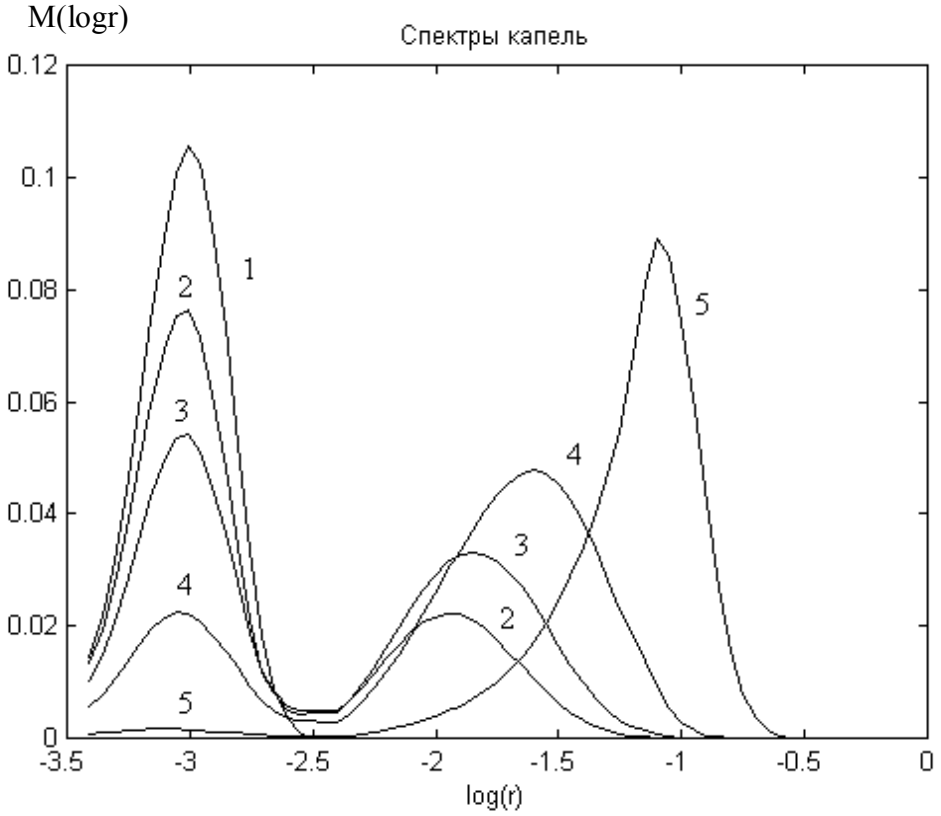


Рисунок 3.21. Изменение спектра облачных капель при коагуляции за 20 минут при различной напряженности электрического поля:

1 – начальное распределение

2 - в отсутствии электрического поля (E_z=0)

3 – в электрическом поле с напряженностью E_z=100 В/см

4 – в электрическом поле с напряженностью E_z=300 В/см

5 – в электрическом поле с напряженностью E_z=1000 В/см

Вследствие взаимодействия облачных частиц радиусами до 20 мкм, которое становится возможным при наличии зарядов на частицах и

значительных электрических полей в облаке (E>50 В/см), в выполненных численных экспериментах наблюдалось ускорение процесса роста частиц осадков и увеличение электрического поля облака.

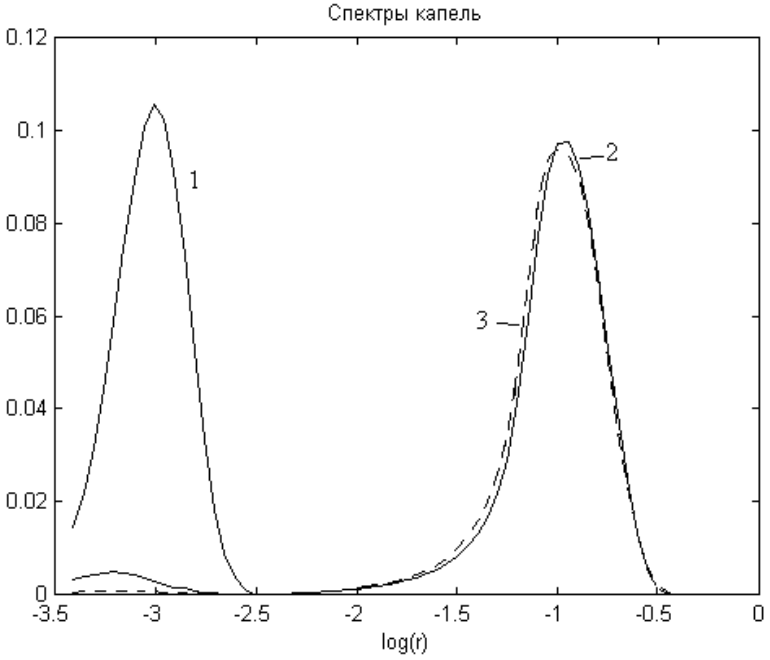


Рисунок 3.22 - Изменение спектра облачных капель при коагуляции

Сравнение времени образования осадков без учета и с учетом электрической коагуляции показало, что во втором случае осадки начинаются на 5-10 минут раньше. Напряженности электрического поля при учете электрической коагуляции растут быстрее, чем без ее учета. Появляются изменения и в спектрах ледяных частиц. В спектрах наблюдаются смещения в сторону крупных частиц.

Численные эксперименты с учетом влияния электрического поля на скорость коагуляции облачных частиц показали, что в последнем случае осадки образуются быстрее, примерно на 10 минут. Заметное влияние электрические поля оказывают на формирование микроструктуры, когда их напряженность достигает значений порядка 50 В/см.

Полученные с помощью модели с детальной микрофизикой результаты отражают нелинейные эффекты физики облаков, которые невозможно исследовать и оценить при использовании более простых моделей.

На основе численных экспериментов теоретически обосновано предположение о возможности быстрого образования зародышей осадков вследствие взаимодействия капель радиусом до 20 мкм при наличии электрических полей в облаках. Заметное влияние электрические поля оказывают на формирование микроструктуры, когда их напряженность достигает значений свыше 50 В/см. В грозоградовых облаках период образования осадков сокращается на одну треть и более.

Подтверждено существование 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, 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.

3.4 Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений

Сравнение с данными наблюдений показало, что полученные в ходе численных экспериментов по разработанной модели параметры удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами [1,68,89,153,182].

Результаты численного моделирования отражаемости облаков согласуются с данными радиолокационных наблюдений, проводимых в теплый период года в военизированных службах Росгидромета, в частности, в Северо-Кавказской военизированной службе по активному воздействию на град и другие процессы. На рисунках 3.23-3.25 приведена радиолокационная отражаемость модельного мощного градового облака.

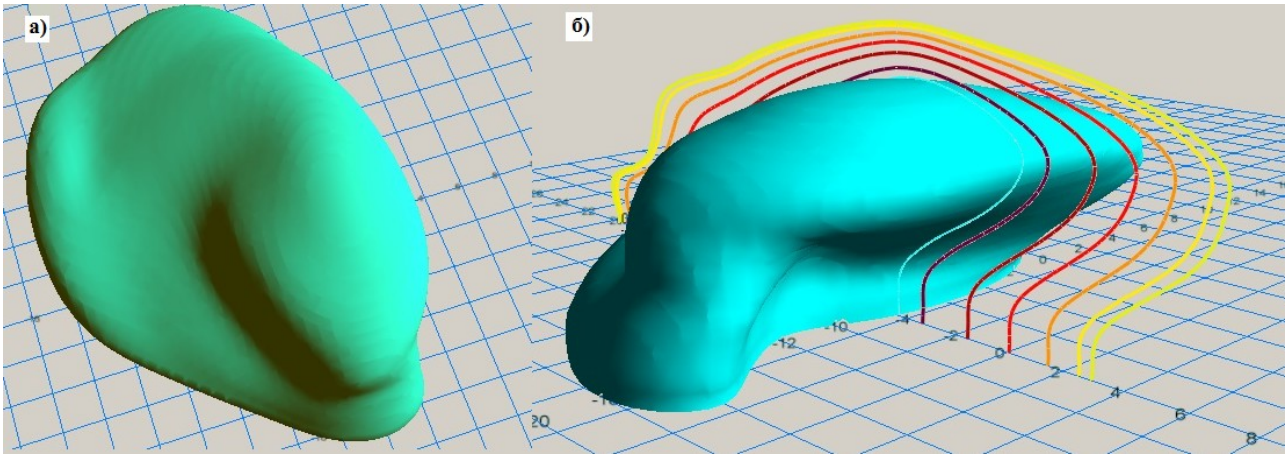


Рисунок 3.23 – Радиолокационная отражаемость Z=45 dBZ на 50 минуте развития: а) вид сверху, б) вид сбоку. На рисунке б) отмечается нависающее радиоэхо, которое наблюдается в реальных облаках [1].

На рисунке 3.26 приведены сравнения результатов расчетов с данными других моделей.

Полученные выше результаты по электрической структуре грозовых облаков (рисунки 3.17-3.20) хорошо согласуются с данными наблюдений. Например, электрическая структура мощного облака по данным работы [221] представлена на рисунке 3.28. Результаты сравнения распределения объемного заряда удовлетворительно согласуются с наблюдениями: в верхней части преобладает положительный электрический заряд, в средней - отрицательный.

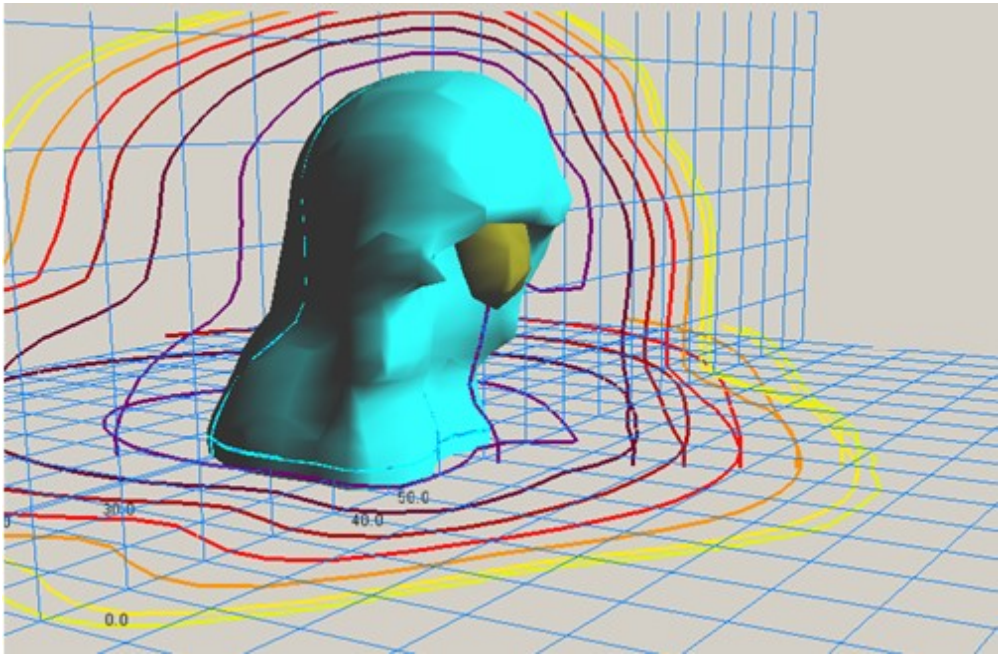


Рисунок 3.24 – Радиолокационная отражаемость модельного облака в трехмерном виде. Отмечается столб отражения крупных частиц и осадков, который согласуется с данными наблюдений.

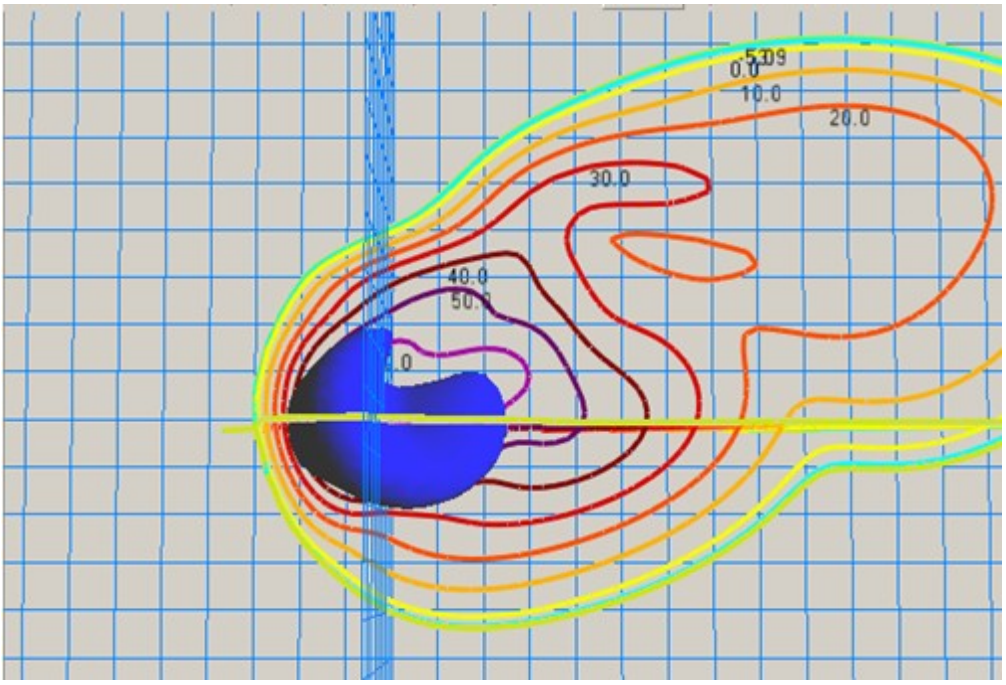
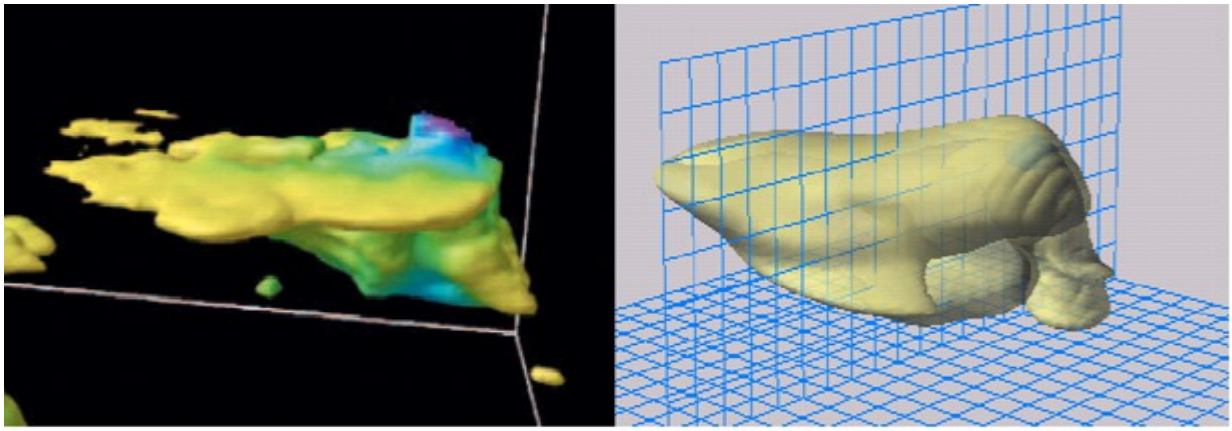
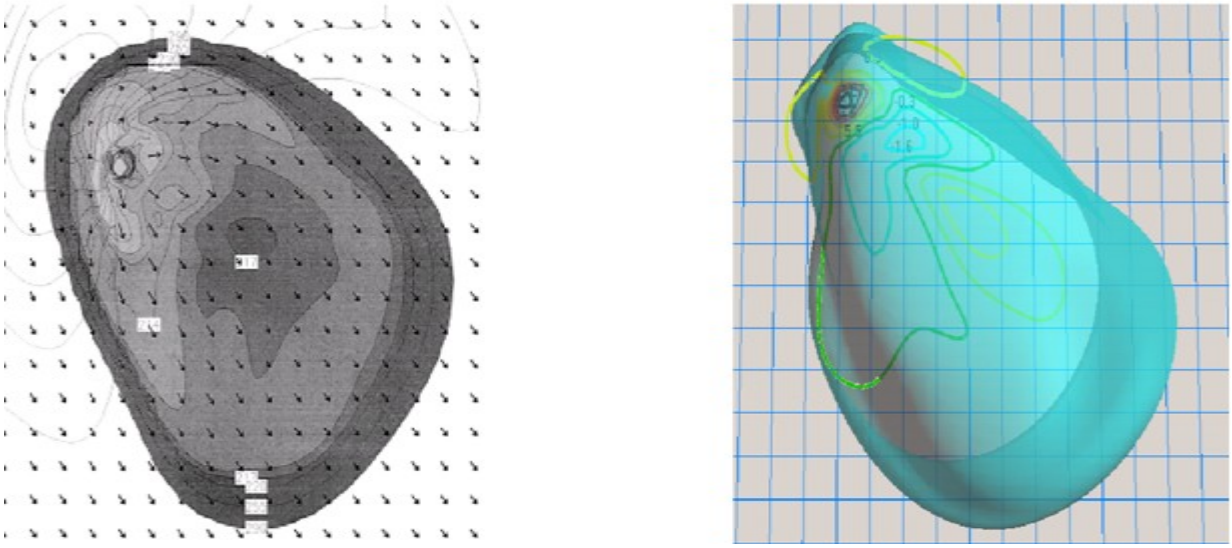
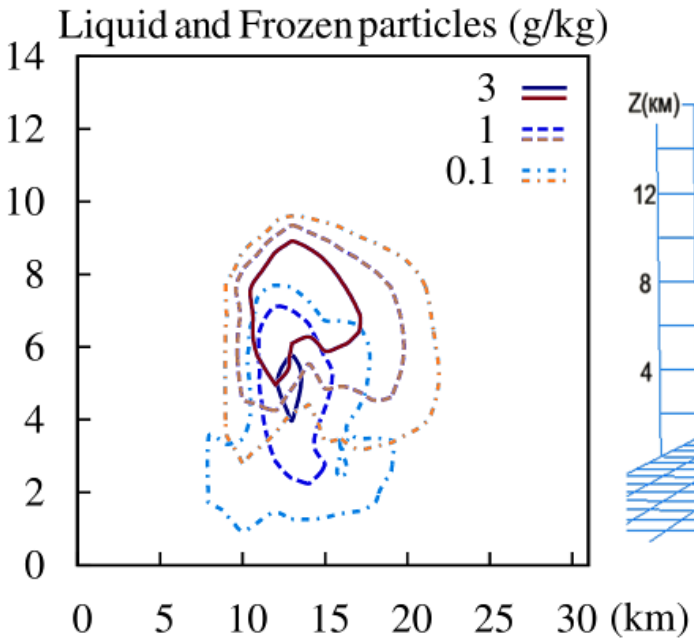


Рисунок 3.25 – Изолинии радиолокационной отражаемости модельного облака в горизонтальном разрезе. Также имеет место согласие с данными полевых наблюдений.







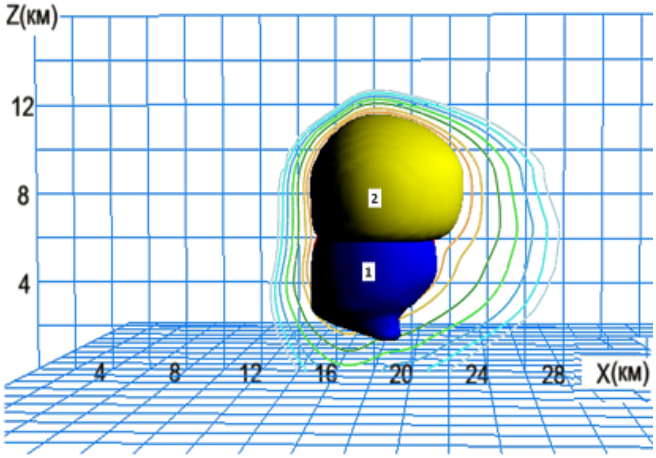


Рисунок 3.26 - Сравнение результатов моделирования по моделям [192], [219], [187] (рисунки слева, сверху вниз соответственно) и по нашим расчетам (рисунки справа).

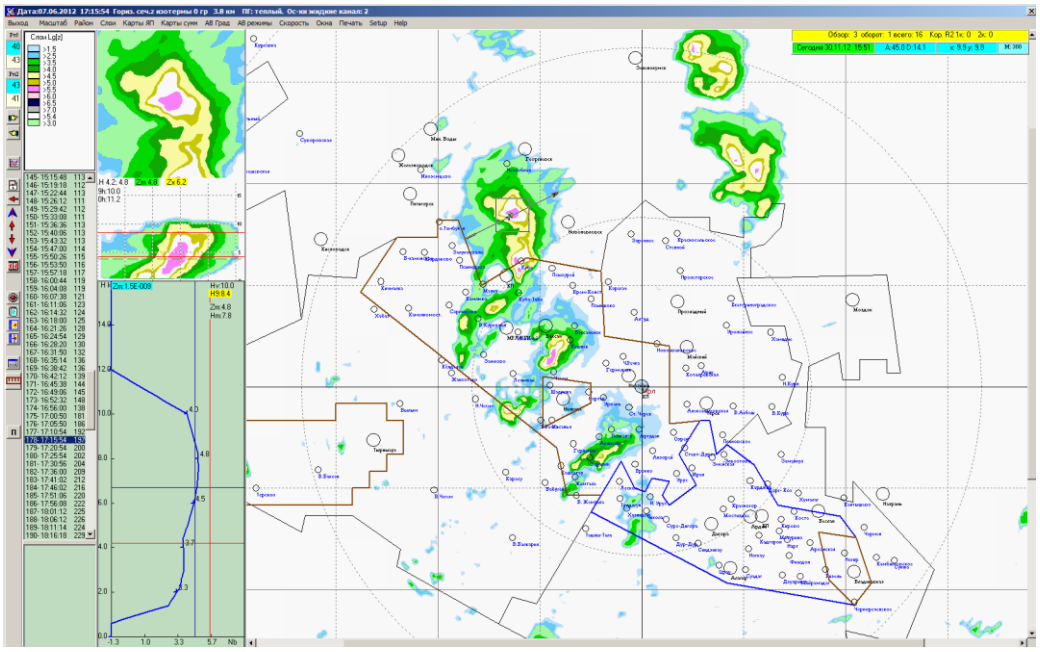


Рисунок 3.27- Карта грозоградовых процессов по данным МРЛ-5 СКВС за 07.06.2012, 17:15 по местному времени (GMT+3). Справа на рисунке отображена карта отражаемости на уровне нулевой изотермы (горизонтальной сечение). В левой части рисунка в центральной части приведен вертикальный разрез грозоградового облака по направлению перемещения.



Рисунок 3.28 - Электрическая структура грозового облака [221].

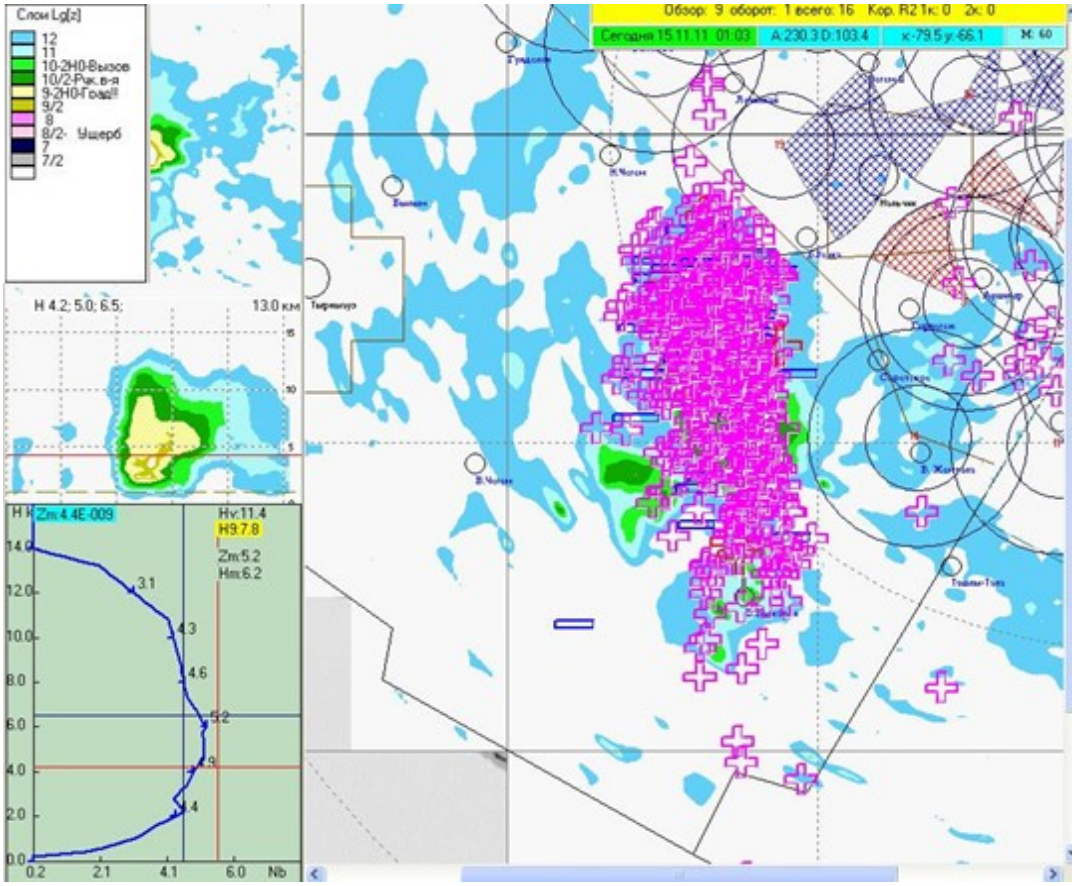


Рисунок 3.29 – Электрические разряды в грозовом облаке по данным радиолокатора МРЛ-5 и грозопеленгационной системы LS8000 [200], работающей на Северном Кавказе.

Следует также отметить, что с помощью модели специалисты получают большой набор динамических, термодинамических и микрофизических параметров в любой точке облака и окружающего его пространства, который крайне необходим для получения научного представления о процессах в облаке. Трехмерная визуализация параметров атмосферы и облаков позволяет интерпретировать результаты на высоком научном уровне, в этом заключается важная роль разработанного прикладного программно-математического обеспечения трехмерной графики [122].

3.5 Исследование влияния структуры ветра в атмосфере на формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков

Как было отмечено выше, на следующем этапе развития физики облаков основное внимание должно быть уделено исследованию роли взаимодействий процессов в облаках и облаков с окружающей атмосферой в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. Детальное изучение этих процессов позволить понять закономерности образования и развития конвективных облаков, которые, в свою очередь, должны быть основой для разработки научно обоснованных методов управления формированием микроструктурных характеристик конвективных облаков. Было также отмечено, что основным методом исследования этих вопросов является математическое моделирование.

Эти взаимодействия относятся к важнейшим факторам, влияющим на формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков.

К работам, посвященным исследованию роли взаимодействия процессов в образовании и развитии облаков, можно отнести работу [23]. В работе на основе двумерной численной модели исследовано влияние деформации полей термодинамических параметров в конвективных облаках на процессы осадкообразования. Как известно, деформация полей этих параметров результатом взаимодействия динамических, термодинамических и микрофизических процессов в облаках.

А к работам, посвященным исследованию роли взаимодействия облаков с атмосферой, относится работа [22]. Отметим, что механизмов взаимодействия облака и атмосферы достаточно много. Одним из них является, например, взаимодействие, обусловленное структурой ветра в атмосфере.

Несмотря на всю важность этого фактора, его роль в процессах облакообразования и формирования параметров облаков до настоящего времени не достаточно исследована.

Ниже приводятся некоторые результаты численного исследования влияния распределения по высоте величины и направления скорости ветра в атмосфере на характеристики облака.

3.5.1 Результаты расчетов конвективного облака без разворота ветра

Для исследования влияния распределения по высоте величины и направления скорости ветра в атмосфере на процессы облако – и осадкообразования были выполнены расчеты образования и развития облаков в двух случаях. В первом случае направление скорости ветра было одинаковым на всех высотах (оно совпадало с направлением оси OX), во втором случае использовались данные зондирования атмосферы, т.е. направление и значение ветра в атмосфере менялись по высоте. Остальные параметры атмосферы для обоих вариантов оставались неизменными.

Развитие облака инициировалось заданием теплового импульса у поверхности земли со следующими параметрами: координаты (центра) (м) - (22000; 22000; 2500), размеры импульса по трем осям координат (м) – (1500; 1500; 2000), перегрев $\Delta T = 1.0^{o}C$.

На рисунках 3.30 - 3.33 приведены результаты расчетов облака на 20-й минуте развития. Были получены такие значения характеристик облака: $W_н$ = -1,780 м/с; $W_в$ = +15,2 м/с, (z=4000 м); водность 5,48 г/м^3 , (z=4500 м); ледность $3*10^{-4}$ г/м^3, (z=5500 м); отражаемость на 10 см 17,5 dBZ , (z=4500 м). В скобках указана высота, на которой параметр принимает данное значение.

На рисунке 3.30 приведены изолинии, соответствующие различным значениям скорости восходящих и нисходящих потоков. Более темным цветом выделена изоповерхность W=10м/с. Как показывают результаты расчетов, структура воздушных потоков внутри и вокруг облака носит достаточно сложный характер. Можно заметить, что восходящие потоки более упорядочены, чем нисходящие. Кроме этого, максимальные значения скорости восходящих потоков воздуха в облаке заметно выше этих же значений

нисходящих потоков. Последние занимают обширную область вокруг зоны восходящих потоков.

На рисунке четко видно, что на формирование поля скоростей воздушных потоков в облаке и вокруг него влияет структура ветра в атмосфере. Под его влиянием нарушается симметричность параметров облака, характеризующих поля восходящих и нисходящих потоков воздуха: зона восходящих потоков наклоняется к горизонтали, структура нисходящих потоков значительно усложняется. Кроме этого некоторое расширение верхней части этой зоны, видимо, можно связать с влиянием ветра в атмосфере.

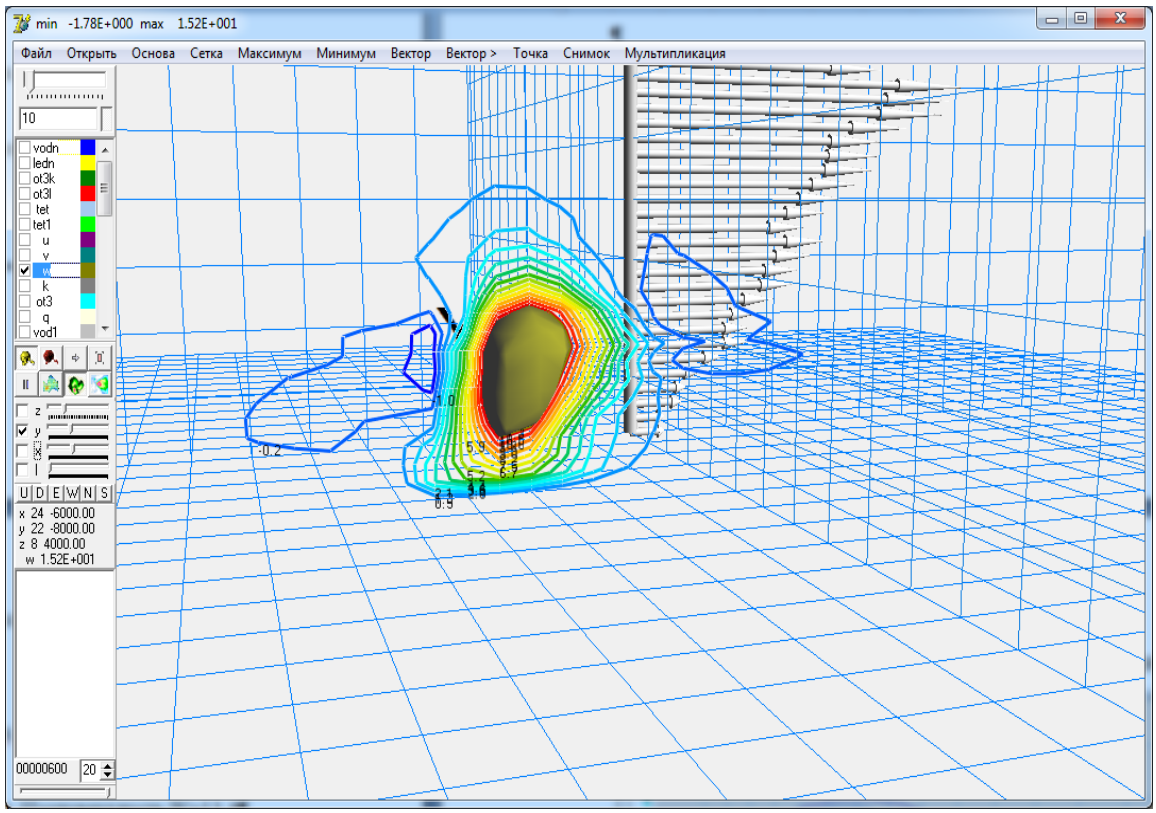


Рисунок 3.30 - Восходящие и нисходящие потоки и горизонтальный ветер по зонду. Изоповерхность W=10 м/с.

По нашему мнению, упорядоченный характер зоны восходящих потоков, связан с тем, что большая энергия неустойчивости атмосферы и, соответственно, большие скорости этих потоков приводят к некоторому ослаблению влияния ветра в атмосфере на структуру восходящих потоков.

Благодаря этому, данная зона по отношению к ветру в атмосфере ведет себя как препятствие, которое обтекается горизонтальным ветром.

Изолинии, соответствующие различным значениям водности, и изоповерхность W=10 м/с изображены на рисунке 3.31.

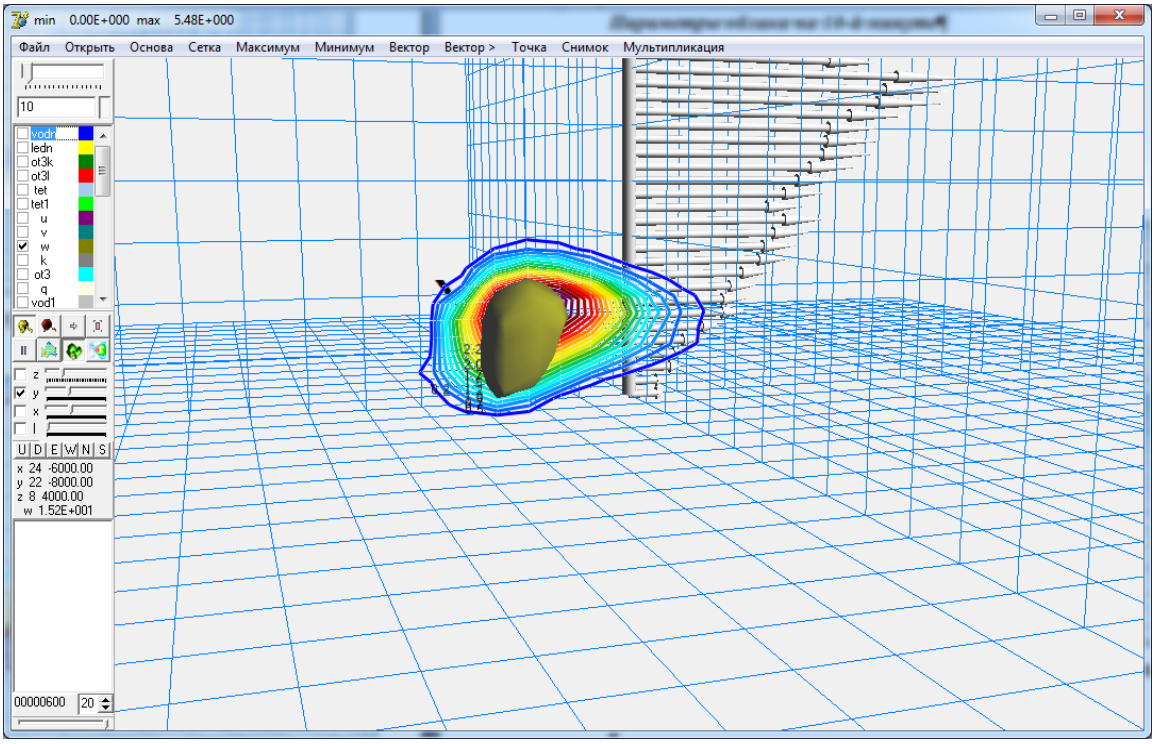


Рисунок 3.31 - Изолинии водности. Изоповерхность W=10 м/с.

Можно заметить, что изолинии водности локализуются в зоне восходящих потоков в облаке, что согласуется с теорией формирования жидкокапельной фракции в облаке. Максимальное значение данного параметра располагается в верхней половине зоны восходящих потоков. Можно также заметить, что под влиянием ветра в атмосфере нарушена симметричность зоны локализации водности в облаке. Верхняя часть данной зоны, как можно заметить, вытянута в направлении ветра в атмосфере. Значительное влияние на форму этой зоны оказывает изменение по высоте значения и направления скорости ветра в атмосфере. В то же время величина водности в облаке в этот момент времени становится достаточно большим: максимальное ее значение немногим меньше 6 г/м^3. Отметим, что водность в облаке в рассматриваемый

момент времени обусловлена жидкокапельной фракцией, а ледность в облаке пока еще незначительна. Она примерно равна $3*10^{-4}$ г/м^3, т.е. фазовые переходы воды в облаке пока еще не очень интенсивны.

Что касается зоны локализации кристаллов в облаке (рисунок 3.32), то она располагается в верхней части зоны восходящих потоков в области отрицательных температур.

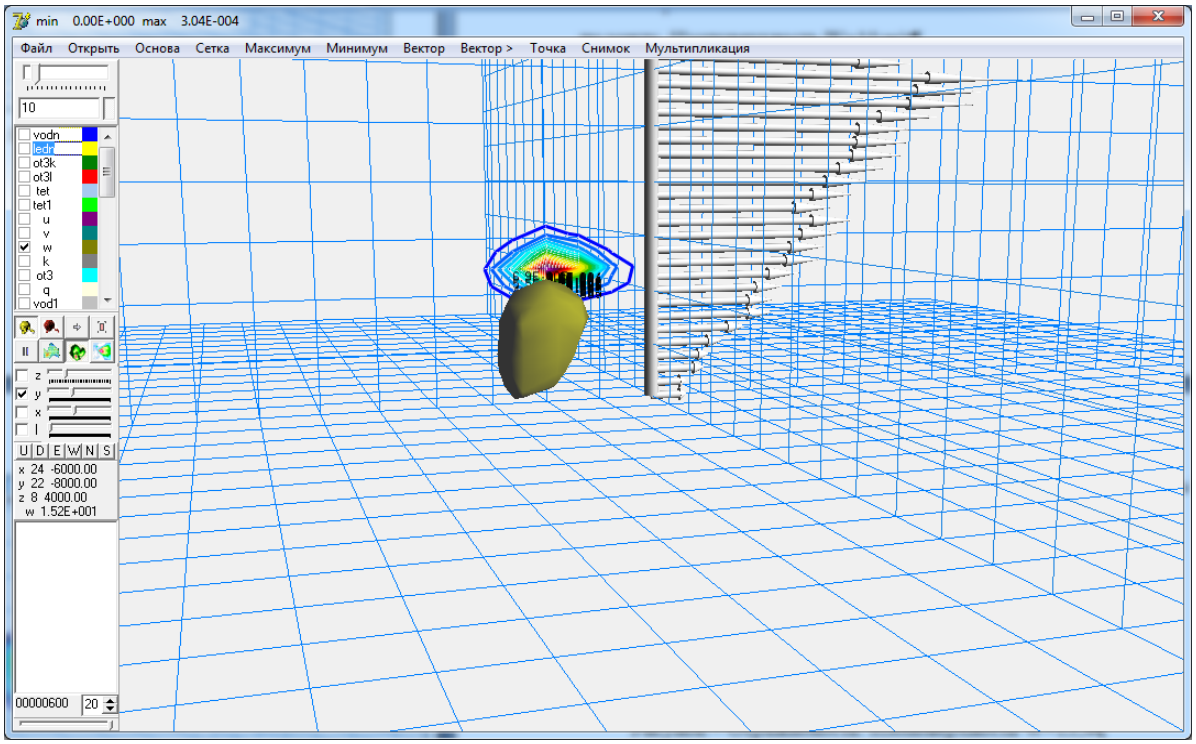


Рисунок 3.32 - Изолинии ледности. Изоповерхность W=10 м/с.

Таким же образом на форму данной зоны заметное влияние оказывает структура ветра в атмосфере – она вытянута в направлении ветра в атмосфере. Но, как уже отмечено, концентрация кристаллов пока еще незначительна. Исходя из значения максимального значения данного параметра, можно предположить, что процессы образования кристаллов пока еще не очень интенсивны.

Как можно было заметить, в модели облака учитываются такие механизмы образования кристаллической фазы как замерзание переохлажденных капель и образование кристаллов за счет активации ядер

сублимации и дальнейшего их роста [31]. Кроме этого предположено, что столкновение кристаллов с каплями приводит к замерзанию последних. С учетом достаточно большого значения водности в облаке в этот момент времени можно предположить, что в формировании кристаллической фазы в облаке участвуют первые два механизма, а кристаллизация капель за счет взаимодействия переохлажденных капель и кристаллов пока еще не очень интенсивна.

На рисунке 3.33 изображены изоповерхность W=10 м/с и изолинии отражаемости на длине волны 10 см.

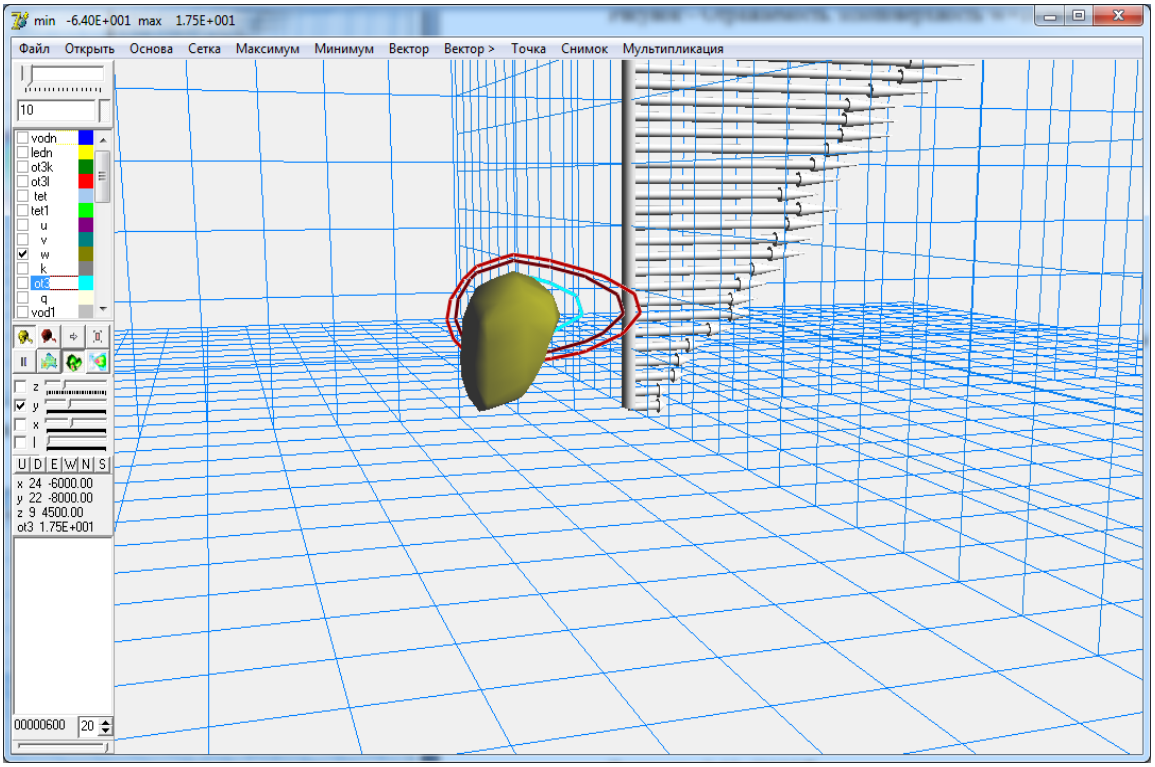


Рисунок 3.33 – Изоповерхность W=10 м/с и изолинии отражаемости

Можно заметить, что изолинии отражаемости в этот момент времени располагаются в верхней части изоповерхности W=10 м/с, охватывая области, где значения водности и ледности максимальны. Можно заключить, что поле отражаемости в облаке в рассматриваемый момент времени формируется каплями и кристаллами, находящимися в зонах их локализации. При этом объем пространства, охватываемый изолиниями отражаемости, достаточно

большой – он сравним с объемом изоповерхности W=10 м/с или даже больше. На формирование изолинии отражаемости и форму пространства, охватываемого ими, значительное влияние, как можно заметить, оказывает распределение по высоте направления и скорости ветра в атмосфере.

На рисунках 3.34 – 3.37 приведены результаты расчетов параметров облака на 30-й минуте развития. Максимальные значения параметров облака в этот момент времени были следующие: $W_н$ = -1,8 м/с; $W_в$ = +17,1 м/с, (z=5000 м), водность 9,02 г/м^3, (z=4500 м), ледность 4,63 г/м^3, (z=6500 м), отражаемость на 10 см 65,5 dBZ , (z=4500 м).

Сравнение этих значений параметров облака с их значениями в предыдущий момент времени показывает, что имеет место заметное их изменение. В первую очередь это относится к максимальному значению ледности, затем к максимальным значениям скорости восходящих потоков и водности в облаке. Таким же образом в разной степени изменились и максимальные значения этих параметров – наблюдается их увеличение. При этом максимальное значение ледности увеличилось на порядки, максимальное значение водности чуть ли не в два раза. Заметно изменились и другие параметры.

Наблюдается также изменение структуры полей различных параметров облака. На рисунке 3.34 приведены результаты расчетов полей скоростей восходящих и нисходящих потоков в облаке и вокруг него. Сравнение рисунков 3.30 и 3.34 показывает, что структуры восходящих и нисходящих потоков в облаке и вокруг него претерпели заметные изменения. Что касается области восходящих потоков, то наблюдается расширение ее верхней части в сторону направления ветра в атмосфере. Если изменение изоповерхности W=10 м/с в основном касается ее размеров, а форма и ориентация ее в пространстве практически не изменились, то структура нисходящих воздушных потоков претерпела существенные изменения. Нисходящие потоки в этот момент времени уже охватывают объем пространства, который больше объема,

охватываемого ими в предыдущий момент времени. В передней части облака появляются области с нисходящими потоками.

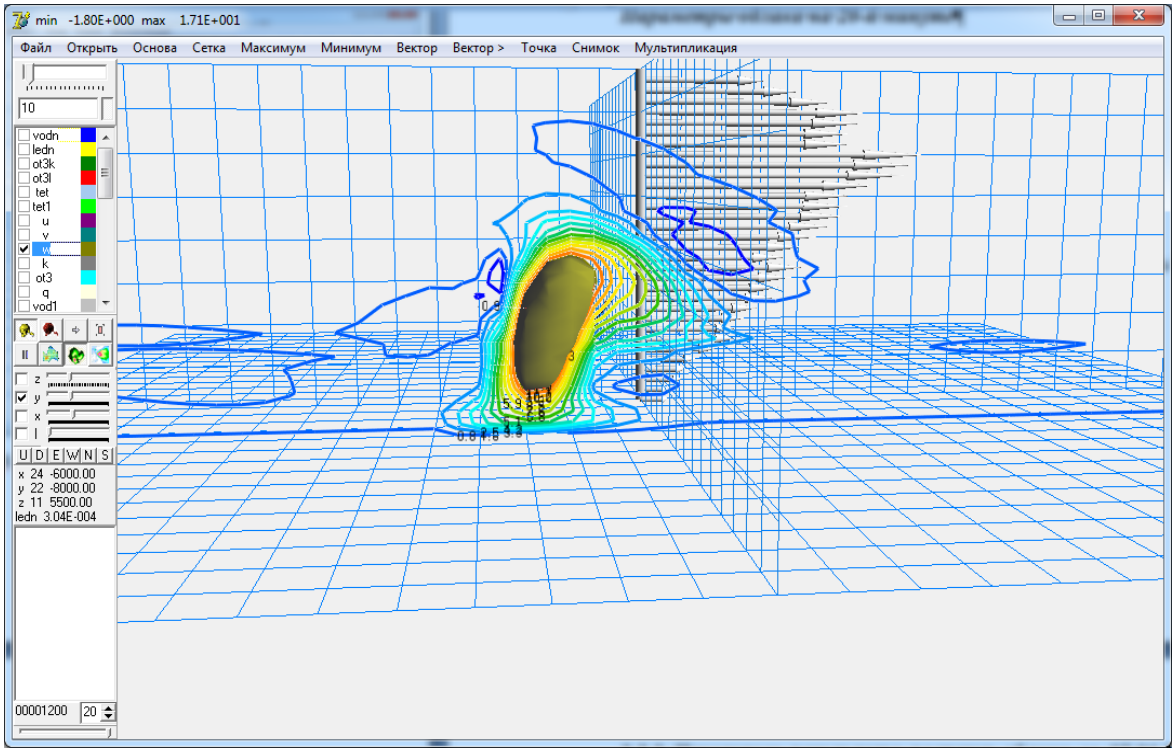


Рисунок 3.34 - Восходящие и нисходящие потоки. Изоповерхность W=10 м/с.

Изолинии различных значений водности и изоповерхность W=10 м/с изображены на рисунке 3.35. Как показывает сравнение рисунков 3.31 и 3.35, имеет место заметное изменение формы и объема изоповерхности W=10 м/с, изменились структуры восходящих и нисходящих воздушных потоков воздуха в облаке и в околооблачном пространстве. Таким же образом структура и положение области локализации капель относительно изоповерхности W=10 м/с существенно изменились. При этом в рассматриваемый момент времени данная область охватывает значительно больший объем, чем в предыдущий момент времени, а зона, в которой наблюдаются повышенные значения водности, уже находится ниже по высоте. Основная часть области локализации водности, включая и область повышенной водности, расположена справа от изоповерхности W=10 м/с и, как можно заметить, достигает поверхности земли.

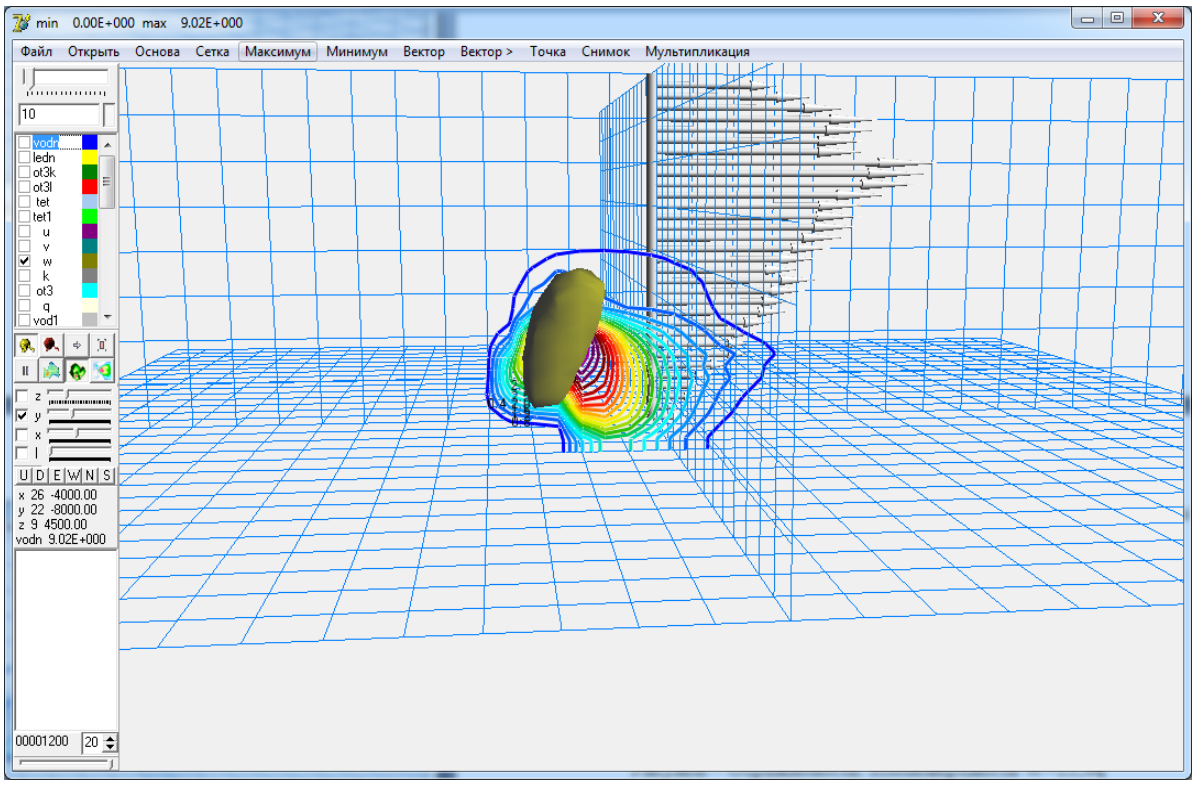


Рисунок 3.35 - Изолинии водности. Изоповерхность W=10 м/с.

Это может свидетельствовать о том, что в облаке появились достаточно крупные капли, которые выпадают из облака, т.е. в облаке имеет место быстрый рост капель при их падении вниз за счет захвата на своем пути более мелких капель (рост за счет процесса коагуляции). Таким образом, в рассматриваемый момент времени из облака уже выпадают жидкие осадки. Для более детального анализа этого процесса рассмотрим процессы формирования ледности в облаке.

На рисунке 3.36 приводятся изолинии ледности в облаке и изоповерхность W=10 м/с в рассматриваемый момент времени.

Можно отметить, что характер трансформации этих изолинии в пространстве и во времени примерно такой же, как изолинии водности. Можно заметить, что область, охватываемая кристаллами в облаке, заметно расширилась. Основная часть этой области расположена справа от изоповерхности W=10 м/с и достигает поверхности земли. Исходя из рисунков

3.35 и 3.36, видимо, можно предположить, что в этот момент времени имеет место выпадение осадков из облака, но они состоят в основном из капель.

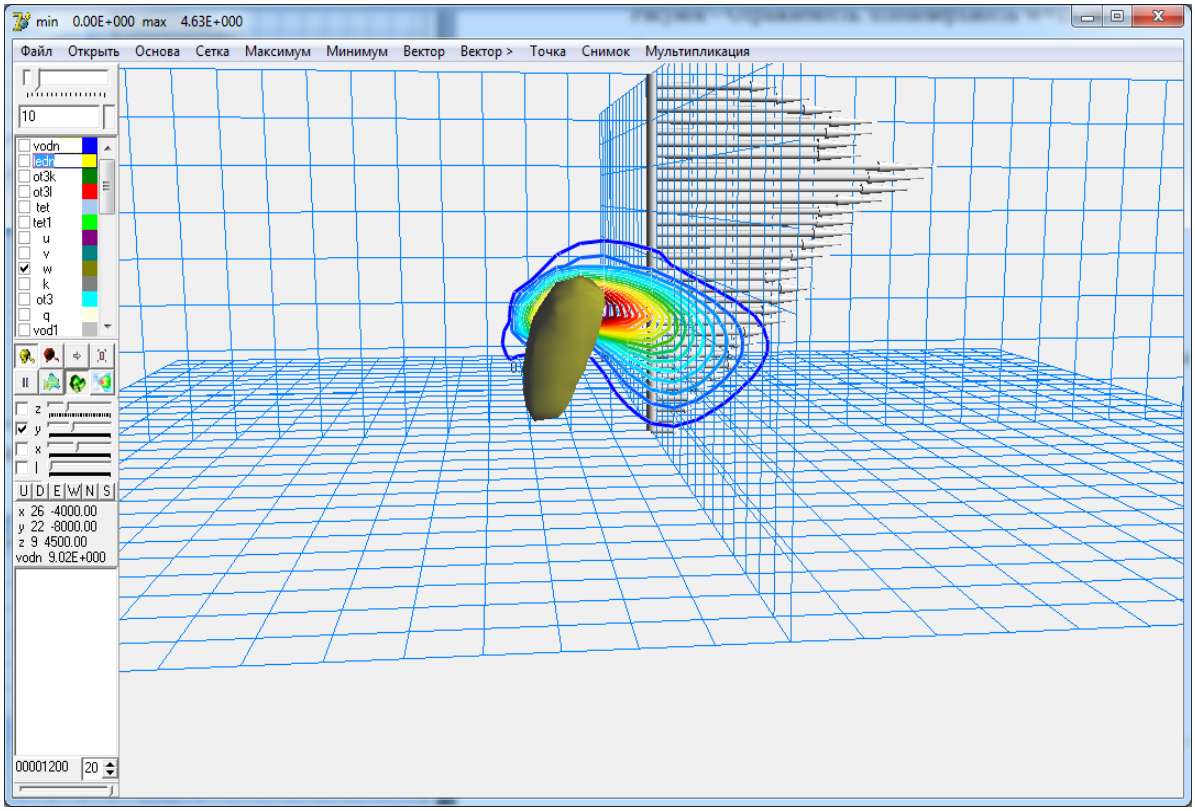


Рисунок 3.36 - Изолинии ледности. Изоповерхность W=10 м/с.

Кроме этого максимальное значение ледности по сравнению с предыдущим моментом времени располагается ниже по высоте – примерно на уровне верхней границы изоповерхности W=10 м/с. Это утверждение относится и к области локализации кристаллической фазы относительно данной изоповерхности. Сравнение рисунков 3.35 и 3.32 показывает, что максимальные значения водности и ледности расположены в различных областях облака, но, как можно заметить, области локализации водности и ледности пересекаются, что является важным условием для взаимодействия капель и кристаллов и образования в облаке крупных кристаллов. Это может свидетельствовать о том, что в облаке существуют условия для интенсивного роста кристаллов. При этом их рост, судя по рисункам, происходит за счет захвата капель кристаллами (за счет процесса аккреции), что приводит к быстрому образованию крупных

кристаллов и выпадению их из облака. Судя по структуре восходящих потоков, которая изображена на рисунке 3.34, капли (за счет которых растут кристаллы) переносятся восходящими потоками вверх в область, где локализуются кристаллы.

Радиолокационная структура облака также изменилась существенно, причем в сторону повышения отражаемости в зоне локализации частиц различных видов. Как можно заметить на рисунке 3.37, зона отражения в облаке существенно увеличилась, что свидетельствует о появлении в этой зоне капель и кристаллов достаточно крупных размеров.

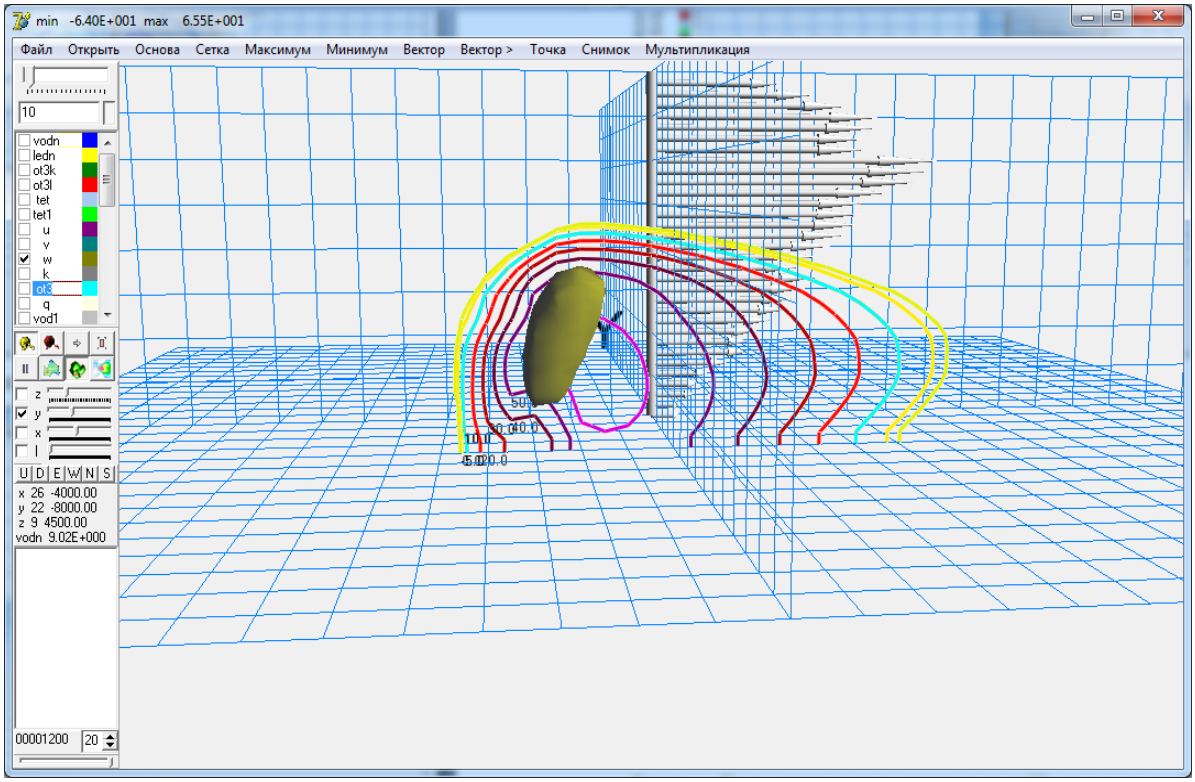


Рисунок 3.37– Изолинии отражаемости и изоповерхность W=10 м/с.

При этом по форме этой зоны можно судить о заметном влиянии структуры ветра в атмосфере на ее формирование - зона вытянулась по направлению ветра в атмосфере. Это подтверждает то, что на формирование зон локализации водности и ледности существенно влияет структура ветра в атмосфере.

Кроме этого, по сравнению с предыдущим моментом времени, область повышенной отражаемости в облаке опустились ниже - данная зона примерно совпадает с областью локализации повышенной водности, она охватывает нижнюю половину изоповерхности W=10 м/с. Такое поведение этой зоны связано с тем, что, как было видно на рисунках 3.34 и 3.35 имело место снижение зон локализации водности и ледности. Кроме этого в облаке уже содержатся крупные капли и кристаллы. Наиболее высокие отражаемости, как можно заметить, совпадает с зоной повышенных значений водности.

На рисунках 3.38-3.41 приведены результаты расчетов облака на 40-й минуте развития. Значения параметров следующие: $W_н$ =-2,4 м/с, $W_в$= +16,4 м/с, (z=5000 м), водность 9,95 г/м^3, (z=3500 м), ледность 3,80 г/м^3, (z=6000 м)., отражаемость на 10 см 66,2 dBZ , (z=3500 м).

Сравнение значений этих параметров облака с их значениями в предыдущий момент времени показывает, что имеет место заметное увеличение максимального значения скорости нисходящих потоков: соответственно -1,8 и -2.4 м/с. Также наблюдается заметное увеличение максимальной водности в облаке – оно составляет примерно 0,93 г/м^3. А что касается значения максимальной ледности, то имеет место его уменьшение примерно на 1 г/м^3 .Такие изменения этих параметров, видимо, связаны с тем, что облако уже приближается к исчерпанию своих ресурсов.

На рисунке 3.38 приведены результаты расчетов полей скоростей восходящих и нисходящих потоков в облаке и вокруг него.

Сравнение этого рисунка с рисунком 3.34 показывает, что структуры восходящих и нисходящих потоков в облаке и вокруг него за рассматриваемый отрезок времени заметно изменились. Что касается области восходящих потоков и изоповерхности W=10 м/с, то, видимо, имеет место уменьшение их объемов. Наблюдается также заметное расширение поля вертикальных воздушных потоков в направлении скорости ветра в атмосфере, а справой стороны изоповерхности W=10 м/с структура данного поля стала заметно более сложной по сравнению с предыдущим моментом времени. Изменение

изоповерхности W=10м/с касается в основном ее размеров, а ее форма и ориентация в пространстве практически не изменились. Нисходящие потоки в этот момент времени уже охватывают больше пространства по сравнению с предыдущим моментом времени.

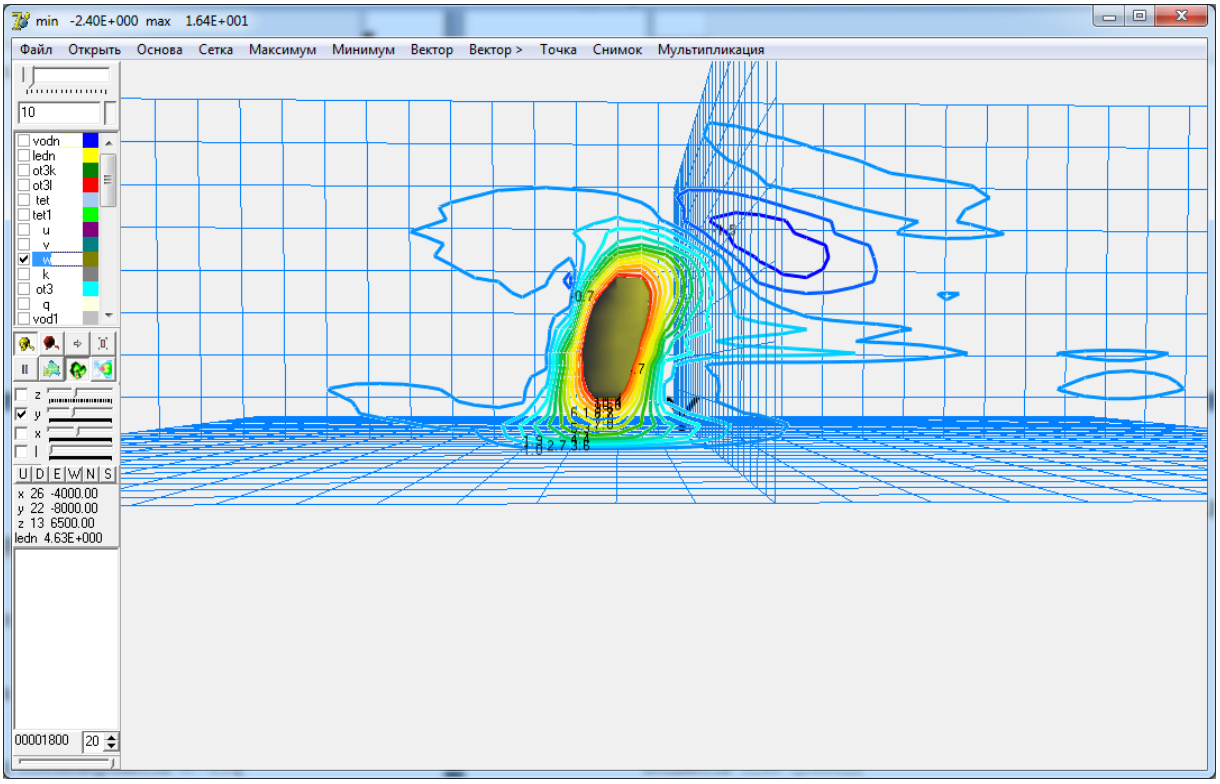


Рисунок 3.38. - Восходящие и нисходящие потоки Изоповерхность W=10 м/с.

Сравнение рисунков 3.30, 3.34 и 3.38 показывает, что тенденция усложнения структуры вертикальных движений воздуха, особенно нисходящих, продолжалось на всем рассматриваемом отрезке времени. Это можно объяснить тем, что из-за относительно небольших скоростей нисходящих потоков воздуха ветер в атмосфере способен оказать большее влияние на формирование их поля. Как и на 20-й минуте развития облака, нисходящими потоками в облаке охвачен достаточно большой объем пространства вокруг облака.

Что касается области локализации капель в облаке, то как можно заметить на рисунках 3.35 и 3.39, то ее положение относительно изоповерхности W=10 м/с мало изменилось. Но в этот момент времени она

опустилась еще ниже и располагается она рядом с нижней половиной изоповерхности W=10 м/с. Важно еще отметить, что по сравнению с предыдущим моментом времени область локализации водности заметно уменьшилась.

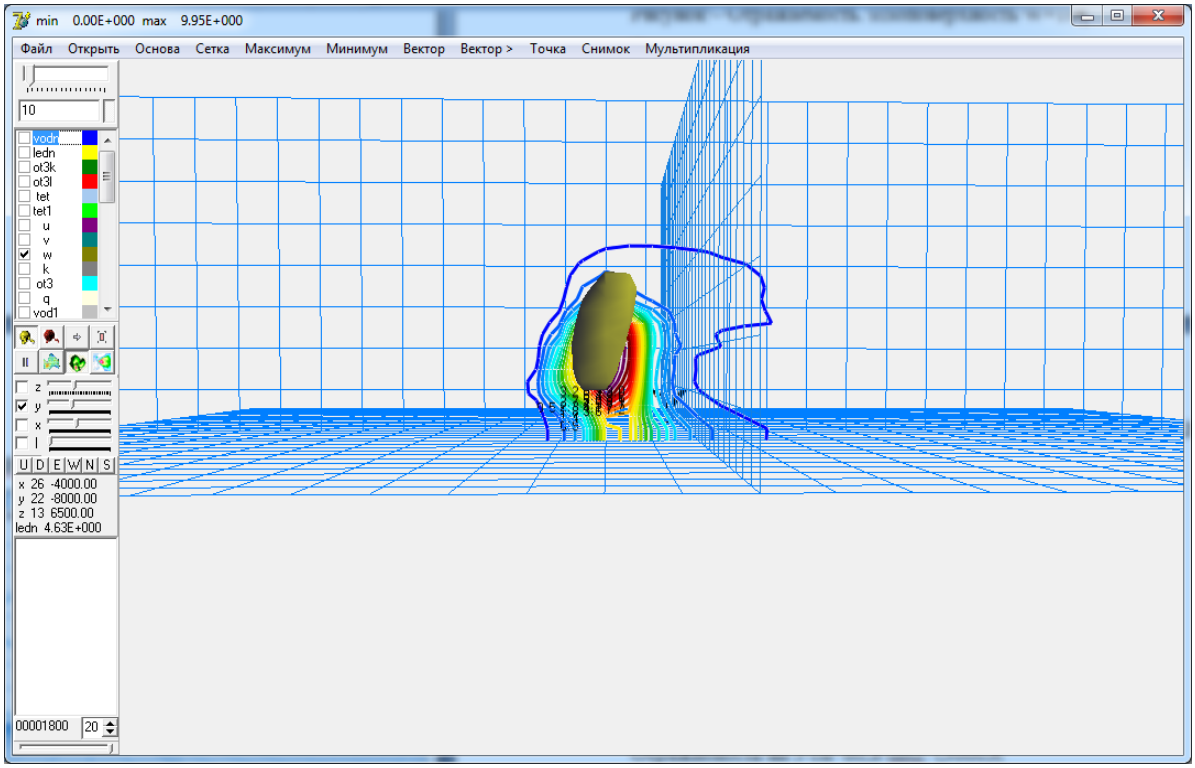


Рисунок 3.39 - Изолинии водности. Изоповерхность W=10 м/с

Такое поведение данной области может свидетельствовать о том, что наступает период разрушения облака. Но, как отмечено, произошло некоторое увеличение максимального значения водности. Судя по полученным результатам, рост кристаллов происходит за счет поступающих в зону их локализации капель. Капли переносятся в эту зону восходящими потоками. А образование и рост капель происходить ниже - в нижней части зоны восходящих потоков (рисунок 3.39).

Результаты расчетов изолиний, соответствующих различным значениям ледности, приведены на рисунке 3.40. Сравнение рисунков 3.36 и 3.40 показывает, что по сравнению с предыдущим моментом времени, структура области локализации ледности в облаке заметно изменилась.

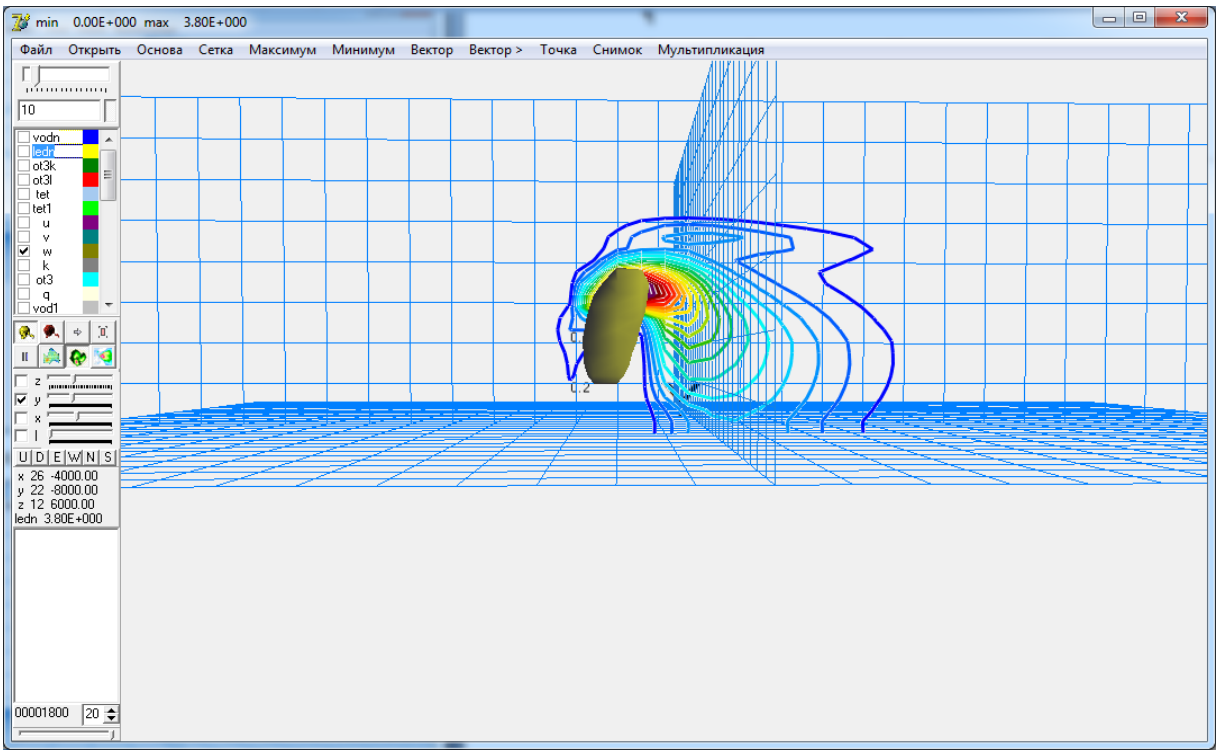


Рисунок 3.40 - Изолинии ледности. Изоповерхность W=10 м/с.

На рисунке четко видно, что зона локализации кристаллов в облаке формируется под сильным влиянием ветра в атмосфере. Зона вытянута в направлении ветра. Зона, в которой расположено максимальное значение данного параметра, локализуется на уровне верхней части изоповерхности W=10 м/с. По результатам расчетов, имеет место некоторое уменьшение максимального значения ледности. Положение области максимальных значений данной характеристики относительно изоповерхности W=10 м/с мало изменилось, но область, охваченная изолиниями данной характеристики, расширилась по горизонтали и опустилась до поверхности земли, что указывает на выпадение из облака твердых осадков. На выпадение осадков из облака, но в виде капель, указывает и то, что изолинии водности достигают поверхности земли.

Сравнение рисунков 3.39 и 3.40 показывает, изолинии различных значений водности и ледности не везде пересекаются на поверхности земли, т.е. на поверхность выпадают осадки, состоящие из капель и кристаллов.

Кроме этого с учетом увеличения водности в облаке и, наоборот, уменьшения ледности, можно предположить, что по сравнению с предыдущим моментом времени в рассматриваемый момент времени спектры частиц осадков претерпели заметные изменения. Они заключаются в том, что содержание в облаке кристаллов крупных размеров, включая и градовые частицы, в этот момент времени может значительно увеличиться.

Сравнение рисунков 3.37 и 3.39 показывает, что радиолокационная структура облака также изменилась существенно. Резко повысилась максимальная отражаемость, а изолинии, соответствующие повышенным значениям данной характеристики облака опустились ниже до поверхности земли (рисунок 3.41). Достигают поверхности земли и изолинии других значений отражаемости, которые охватывают области локализации водности и ледности. Полученная радиолокационная структура облака свидетельствует о том, что в нем появились капли и кристаллы достаточно больших размеров и большой концентрации, которые выпадают жидких и твердых осадков, в том числе в виде града. На рисунке также видно, что на формирование радиолокационной структуры облака существенное влияние оказывает ветер в атмосфере. Изолинии значений отражаемости под его влиянием вытянулись в направлении ветра. Зона повышенных значений отражаемости расположена на уровне нижней половины изоповерхности W=10 м/с.

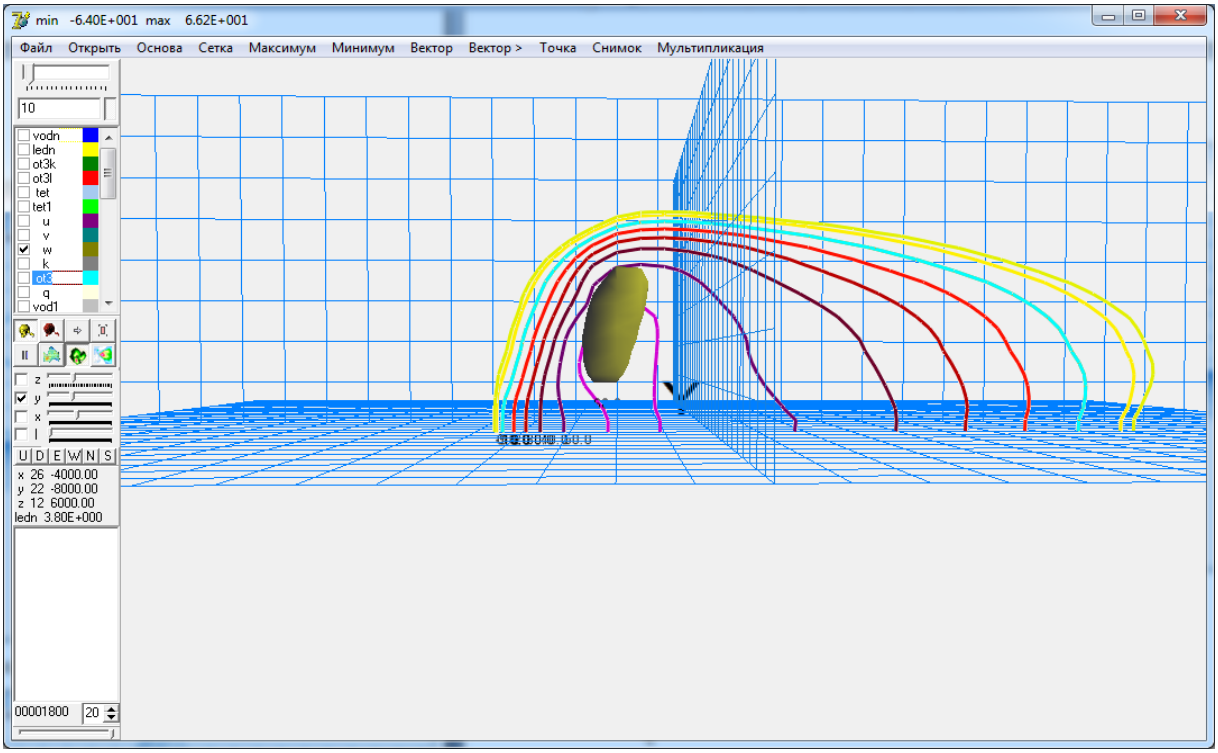


Рисунок 3.41 – Изолинии отражаемости и изоповерхность W=10 м/с.

На рисунке 3.42 приведены изолинии различных значений отклонения температуры в зоне грозового облака от температуры в атмосфере на том же уровне. Также приведены изоповерхности восходящего потока (10 м/с) и ледности (2 г/м^3).

Обращает на себя внимание расположение изоповерхностей восходящего потока и ледности. Изоповерхность ледности расположена в верхней части облака, данная изоповерхность и верхняя часть изоповерхности W=10 м/с находятся на одном уровне, создается впечатление, что они изолированы друг от друга. Важно отметить, что под влиянием ветра в атмосфере зона выпадения осадков и зона восходящих потоков получаются разнесенными в пространстве, что указывает на то, что выпадение осадков не может повлиять на восходящие потоки, а тем более подавить их.

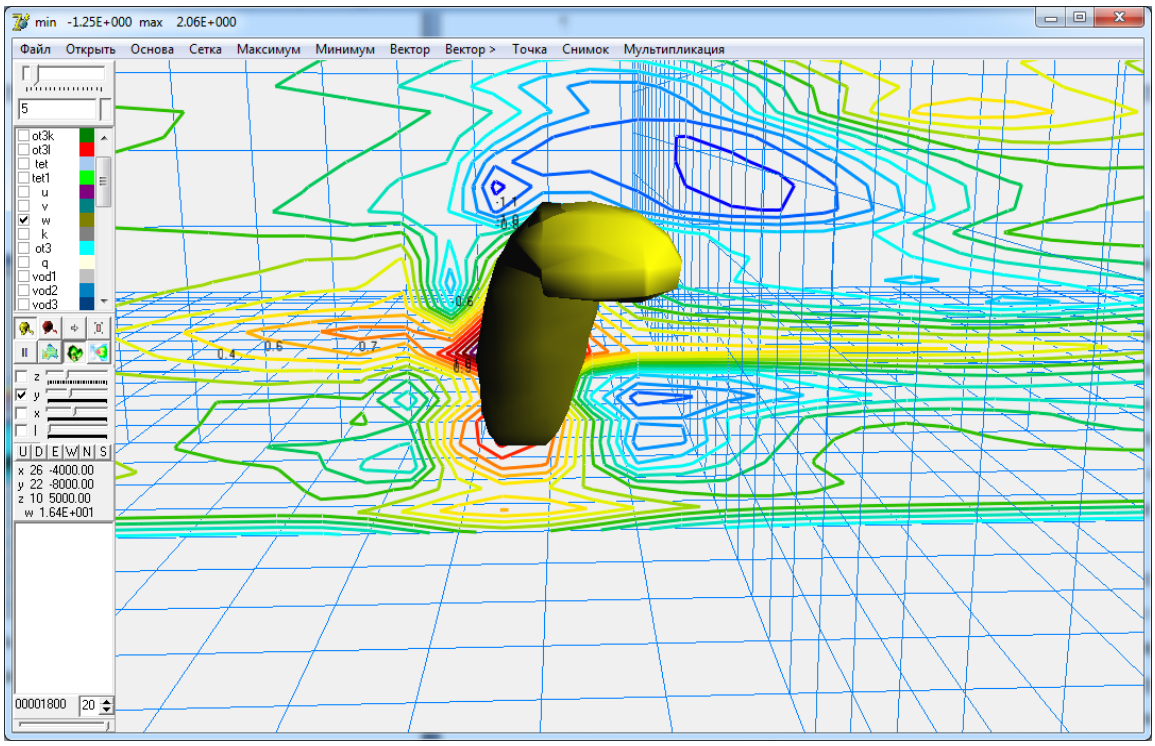


Рисунок 3.42 – Изоповерхности восходящего потока 10 м/с, ледность (2 г/м^3), отклонение температуры от значений в окружающей атмосфере.

Можно еще заметить, что процессы облакообразования в атмосфере сопровождаются значительным возмущением температурного поля в атмосфере. При этом, как можно заметить, оно крайне неоднородно: зоны, в которых температура выше, чем в атмосфере на этом же уровне, чередуются с зонами, где эта температура, наоборот, ниже, чем в атмосфере. Выше зоны восходящих потоков, где наблюдаются нисходящие движения воздуха, сформировалась обширная область, в которой температура ниже, чем в атмосфере. Такая же зона образовалась, как можно заметить, в подветренной части облака под зоной локализации кристаллов.

3.5.2 Исследование развития облака с разворотом горизонтального ветра с высотой

Остановимся на результатах расчетов образования и развития этого же облака, но с реальным распределением по высоте ветра в атмосфере, т.е. когда

направление и скорость ветра меняются по высоте. Для проведения расчетов использовались те же данные аэрологического зондирования атмосферы за 07.06.2012 (пункт зондирования аэропорт Минеральные Воды). Условия в этот день, как было отмечено, были благоприятными для развития интенсивного многоячейкового градового процесса и по радиолокационным данным Северо-Кавказской военизированной службы в этот день по КБР и Ставропольскому краю прошли градовые процессы, отмечалось выпадение града на землю (d=1,5-4 см). Развитие облака инициировалось заданием такого же теплового импульса у поверхности земли: координаты (центра) (м) - (22000; 22000; 2500), размеры импульса по трем осям координат (м) – (1500; 1500; 2000), перегрев $\Delta T = 1.0^{o}C$.

Остановимся на результатах расчетов. На рисунках 3.43-3.45 приведены результаты расчетов параметров облака на 20-й минуте его развития. На них представлены изоповерхность скорости вертикальных потоков W=10м/с, изолинии водности и ледности в вертикальной плоскости, проходящей через центр облака параллельно оси OX. Справа на рисунках приведено распределение по вертикали скорости ветра в атмосфере. Стрелки указывают направление ветра, а их длина пропорциональна значению скорости. Можно заметить, что изменение ветра по направлению и величине носит достаточно сложный характер. Рассчитывалась и радиолокационная структура облака на длине волны 10 см., но результаты расчетов на рисунке не приводятся.

Максимальные значения параметров облака в данный момент времени оказались равными: скорости нисходящих $W_н$ = -1,86 м/с и восходящих потоков $W_в$ = 17,3 м/с, (z=4000 м); водности 5,78 г/м^3, (z=4500 м); ледности $5*10^{-4}$ г/м^3, (z=5500 м); отражаемости на 10 см 17,5 dBZ, (z=4500 м). В скобках указана высота, на которой параметр принимает данное значение. Из этих результатов можно заметить, что облако развивается достаточно интенсивно – интенсивнее, чем в рассмотренном выше случае, когда направление скорости ветра на всех высотах было одинаковым. За относительно небольшой отрезок времени значения скорости восходящих потоков и водности в облаке выросли заметно.

Максимальные значения скорости восходящих и нисходящих потоков, а также водности в облаке оказались выше, чем в предыдущем случае. Это свидетельствует о том, ветер в атмосфере влияет не только на форму зон локализации или изолиний различных параметров облака. Он влияет и на скорость развития облака и на значения его параметров.

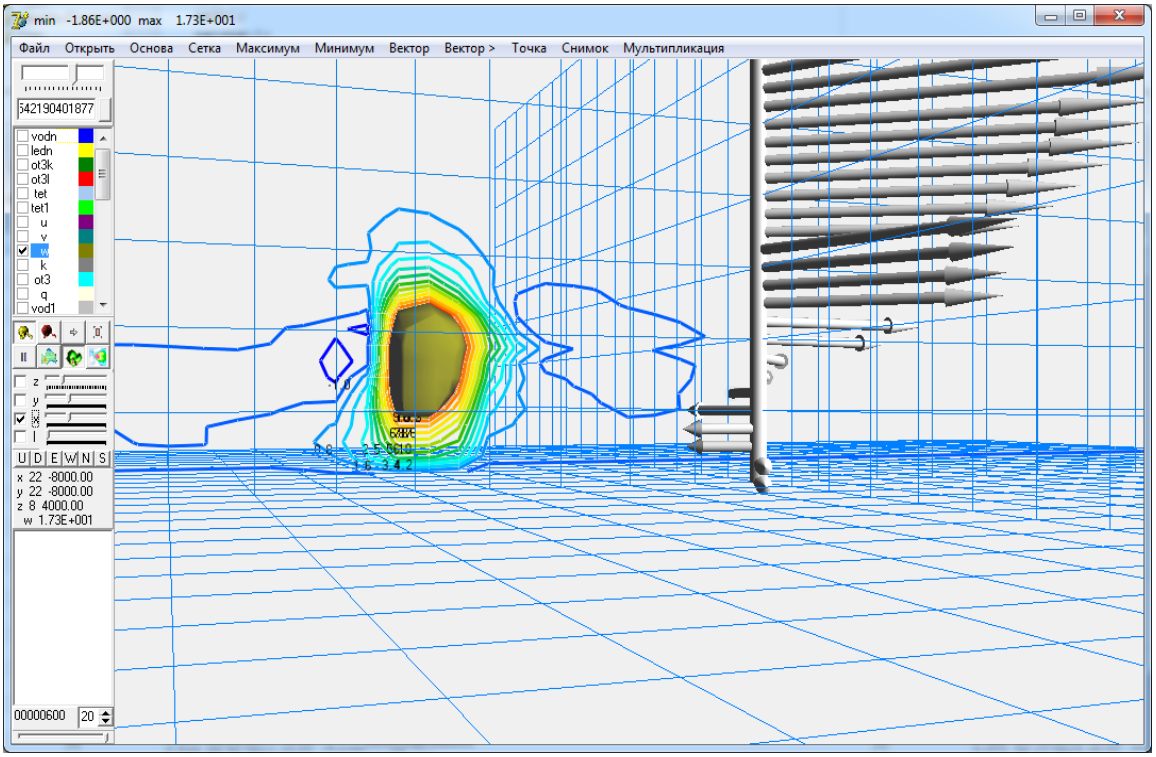


Рисунок 3.43 - Восходящие и нисходящие потоки и горизонтальный ветер по зонду. Изоповерхность W=10 м/с. (10 мин.).

Изолинии, соответствующие различным значениям скорости восходящих и нисходящих потоков, а также изоповерхность W=10м/с приведены на рисунке 3.44. Можно заметить, что структура воздушных потоков внутри облака и вокруг него и в этом случае носит достаточно сложный характер, при этом восходящие потоки более упорядочены, чем нисходящие, которые занимают обширную область вокруг зоны восходящих потоков. На формирование полей воздушных потоков в облаке и вокруг него влияет структура скорости ветра в атмосфере. Как и в предыдущем случае, в результате влияния ветра и в рассматриваемом случае нарушена

симметричность полей характеристик облака. Зона восходящих потоков, как и в предыдущем случае, наклонена к горизонтали.

Сравнение рисунков 3.30 и 3.43 показывает, что поля воздушных потоков в данный момент времени имеют заметные различия для различных вариантов распределения скорости ветра по высоте. По сравнению с вариантом, когда направление скорости ветра не менялось с высотой, наклон к горизонтали изоповерхности W=10 м/с уменьшился, а объем зоны восходящих потоков, видимо, уменьшился незначительно. Зато имеет место увеличение зоны нисходящих потоков, а их структура стала более сложной по сравнению с предыдущим вариантом.

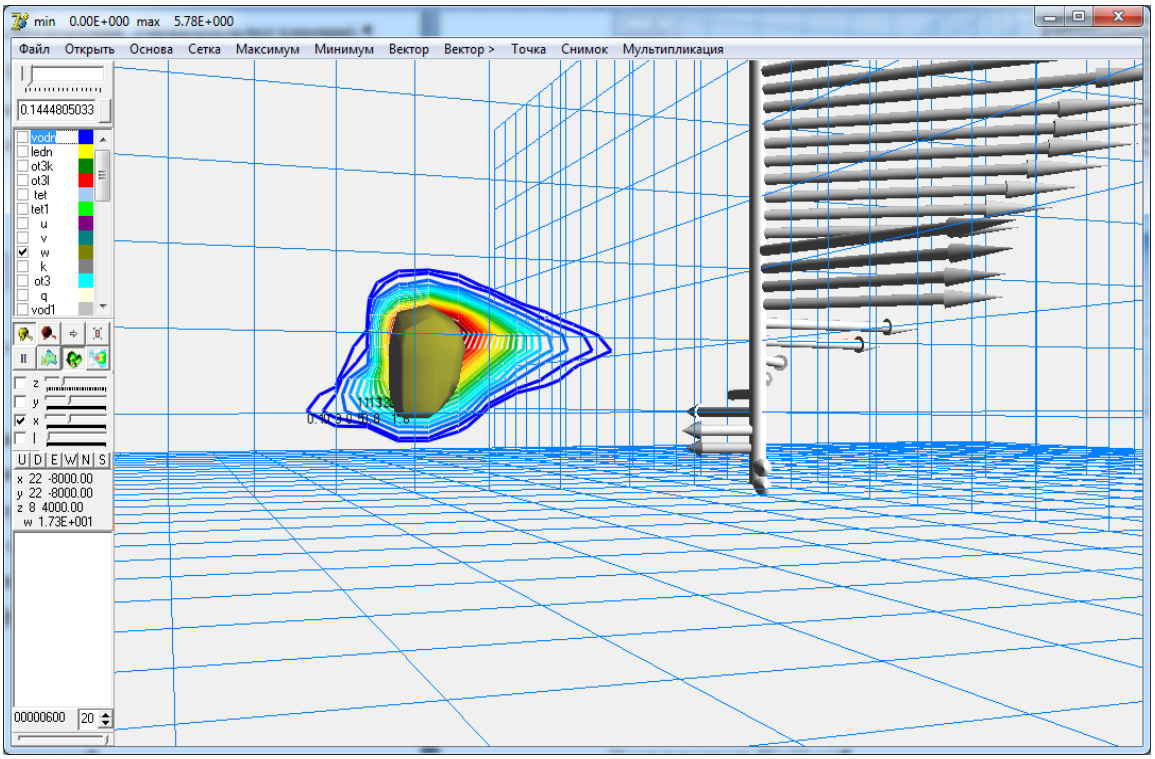


Рисунок 3.44 - Изолинии водности. Изоповерхность W=10 м/с.

Отметим, что объяснить однозначно каким образом влияет изменение распределения характеристик ветра в атмосфере на скорости восходящих и нисходящих потоков и на значение максимальной водности и ледности не представляется пока еще возможным.

Как можно заметить на рисунке 3.44 изолинии водности в облаке локализуются в зоне восходящих потоков. Можно также заметить, что под влиянием ветра в атмосфере нарушена симметричность зоны локализации водности в облаке.

Верхняя и нижняя части данной зоны вытянуты в направлении горизонтальной составляющей ветра в атмосфере. Можно заметить, что роль структуры ветра в атмосфере в формировании формы данной области значительна. На это указывает сравнение рисунков 3.31 и 3.44. Таким же образом величина водности в облаке достаточно большая: максимальное ее значение немногим меньше 6 г/м^3. Что касается водности в облаке, то она обусловлена преимущественно жидкокапельной фракцией, а ледность в облаке пока еще незначительна. Она примерно равна $5*10^{-4}$ г/м^3, т.е. фазовые переходы в облаке пока еще не очень интенсивны.

Область формирования кристаллов, как и в предыдущем варианте, расположена на уровне верхней части изоповерхности W=10 м/с (рисунок 3.45). По результатам расчетов, в силу малой концентрации и незначительных размеров кристаллов в рассматриваемый момент времени, радиолокационная структура облака формируется преимущественно жидкокапельной фракцией.

Сравнение рисунков 3.32 и 3.45 показывает, что во втором случае может иметь место некоторое уменьшение объема зоны локализации кристаллов в облаке. Кроме этого, наклон изоповерхности W=10 м/с к горизонтали во втором случае уменьшился. Но положение зоны локализации кристаллов относительно изоповерхности W=10 м/с осталось без изменений – она располагается в на уровне верхней части данной изоповерхности.

Таким образом, по результатам анализа развития облака с двумя вариантами структуры ветра в атмосфере, характер формирования зоны локализации ледяной фазы в облаке в этот момент времени не очень существенно меняется.

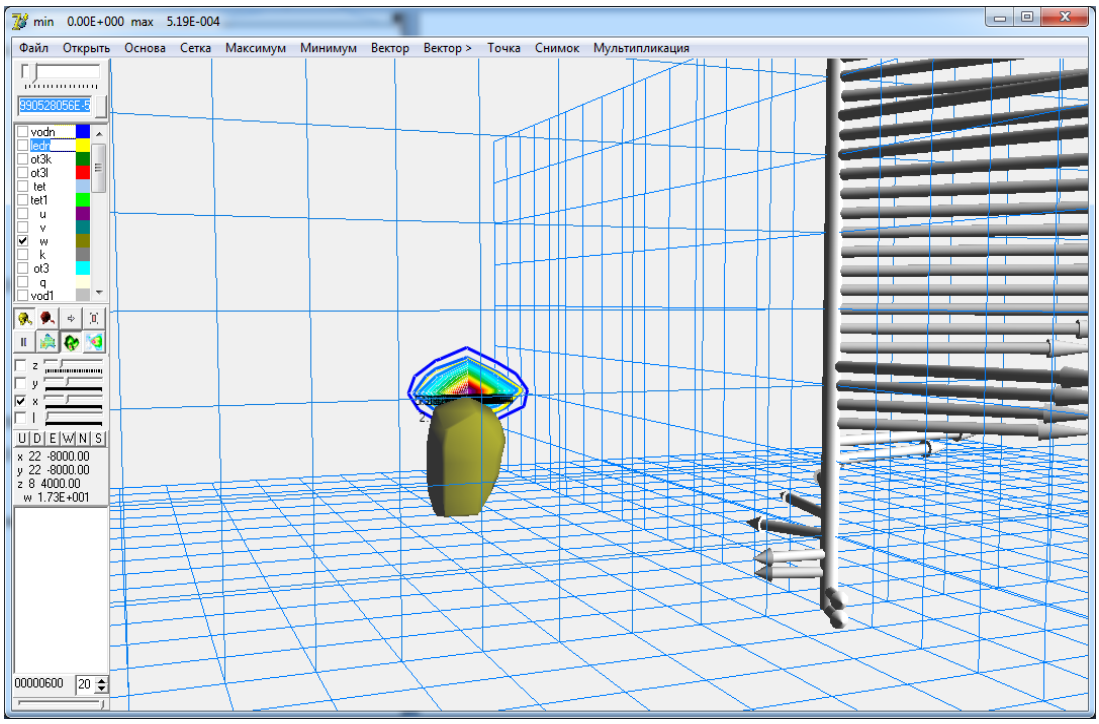


Рисунок 3.45 - Изолинии ледности. Изоповерхность W=10 м/с.

Остановимся далее на формировании параметров облака на 30-й минуте его развития. Максимальные значения параметров облака в этот момент времени были следующие: скорости нисходящих и восходящих потоков $W_н$ = -2,26 м/с и $W_в$ = 16,4 м/с, (z=4500 м); водности 7,77 г/м^3, (z=4000 м); ледности 3,94 г/м^3, (z=6500 м); отражаемости на 10 см 17,5 dBZ, (z=4000 м).

Можно заметить, что по сравнению с предыдущим моментом времени имеет место некоторое уменьшение скорости восходящих потоков, а максимальное значение скорости нисходящих потоков, наоборот, заметно увеличилось. Наблюдается уменьшение по сравнению с предыдущим вариантом максимальных значений водности и ледности. Изменились также высоты, на которых располагаются рассматриваемые параметры облака: ниже оказались максимальные значения скорости восходящих и нисходящих потоков, а также водности. Положение максимального значения остальных параметров не изменилось.

В целом можно отметить, что при втором варианте задания ветра в атмосфере параметры облака меньше, чем в первом, т.е. в этом случае получается облако, которое слабее, чем в первом случае.

Результаты расчетов параметров облака на 30-й мин. приводятся на рисунках 3.46-3.48. Максимальные значения параметров облака следующие: скорости нисходящих и восходящих потоков $W_н$ = -1,91м/с и $W_в$ = +13,7 м/с, (z=4500 м); водности 3,43 г/м^3, (z=3000 м); ледности 6,15 г/м^3, (z=4500 м); отражаемости на 10 см 60,8 dBZ, (z=4000 м). Можно заметить некоторое уменьшение максимального значения скорости нисходящих потоков и такое же увеличение (на 2,7 м/с) скорости восходящих потоков по сравнению с их значениями на 20 мин. развития облака.

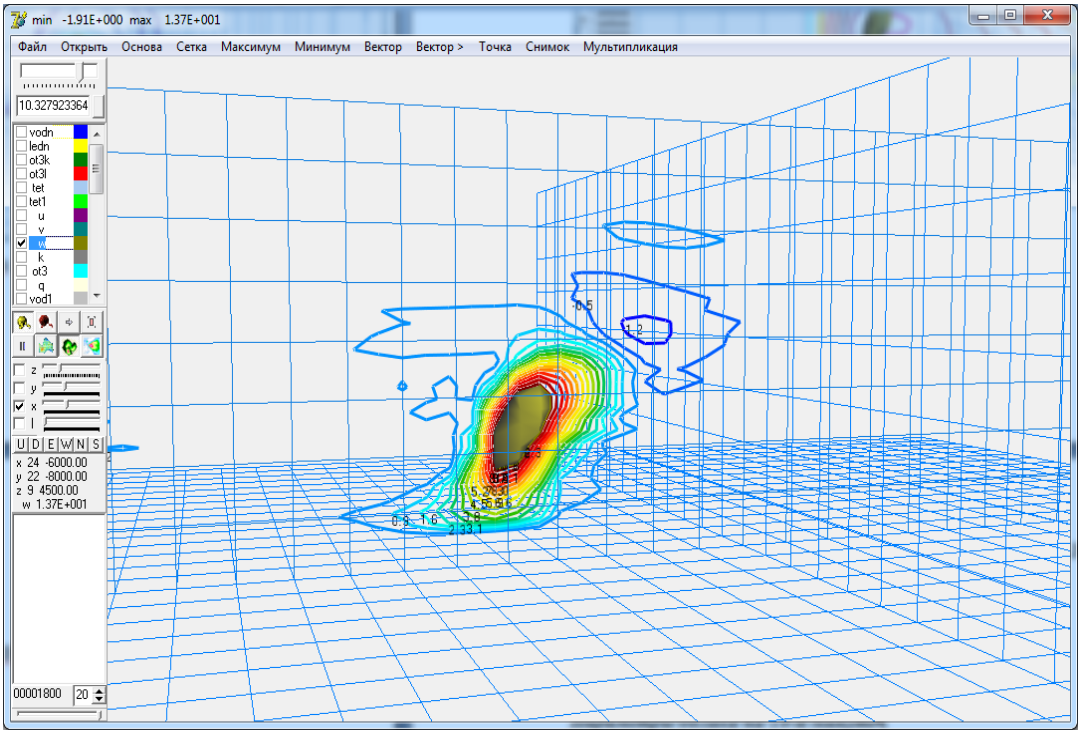


Рисунок 3.46 - Восходящие и нисходящие потоки и изоповерхность W=10 м/с.

Зона восходящих потоков при этом приняла форму, типичную для градовых процессов (рисунок 3.46). Она заметно изменилась по сравнению с предыдущим вариантом: наклон к горизонтали стал больше, верхний уровень стал выше по высоте.

Но, как показывает сравнение рисунков 3.34 и 3.46, в случае, когда направление скорости ветра в атмосфере одинаково на всех высотах, объемы

изоповерхности W=10 м/с и зоны восходящих потоков в целом больше, чем при его изменении с высотой. Это свидетельствует о том, что облако, которое образовалось в этом случае, является более мощным, чем при наличии поворота ветра с высотой. Сравнение этих же параметров с параметрами облака, которое было получено в предыдущем варианте, показывает, что имеет место некоторое уменьшение скорости восходящих и нисходящих потоков. Наблюдается заметное уменьшение по сравнению с предыдущим вариантом максимального значения водности и, наоборот, почти двукратное увеличение максимального значения ледности. Уменьшились также высоты, на которых располагаются почти все параметры облака.

На рисунке 3.47 приведены изолинии водности и изоповерхность W=10 м/с. Можно заметить, что область локализации водности является достаточно обширной.

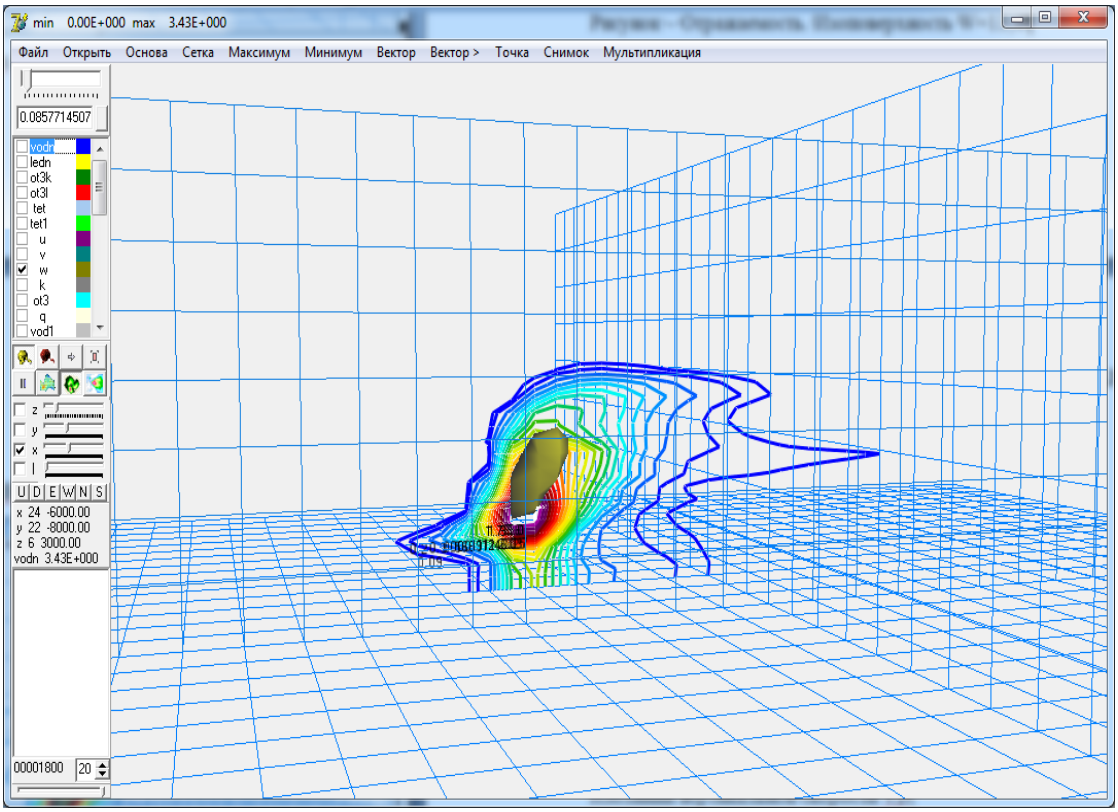


Рисунок 3.47 - Изолинии водности и изоповерхность W=10 м/с.

Кроме этого ее форма формируется под значительным влиянием распределения по высоте ветра в атмосфере. Верхняя и нижняя части данной области вытянуты в разные стороны – в направлении ветра в атмосфере на этих уровнях. Можно еще заметить, что зона повышенной водности располагается достаточно низко – на уровне нижней части изоповерхности W=10 м/с, а некоторые изолинии данного параметра облака достигают поверхности земли, что указывает на то, что из облака выпадают жидкие осадки.

Сравнение рисунков 3.36 и 3.47 показывает, что структуры этой зоны, соответствующие рассматриваемым вариантам распределения ветра в атмосфере, заметно различаются. В последнем случае объем этой зоны стал больше, а структура поля водности сложнее. По сравнению с предыдущим моментом времени максимум водности в облаке заметно уменьшился – больше чем на 4 г/м^3, а максимальное значение ледности, наоборот увеличилось, примерно, на 2 г/м^3. Максимум водности оказался в нижней половине зоны восходящих потоков (рисунок 3.47), а область локализации ледяных частиц в облаке снизилась на 2000 м. Она располагается над областью локализации капель и правее зоны восходящих потоков (рисунок 3.48).

Сравнение этих рисунков показывает, что зона локализации кристаллов практически совпадает с зоной локализации капель. Очевидно, что это благоприятствует интенсивному поглощению переохлажденных капель ледяными частицами. Это может быть причиной быстрого уменьшения водности в облаке.

Что касается зоны локализации ледности, то, как можно заметить, в рассматриваемый момент времени она также охватывает достаточно большой объем пространства. Зона повышенной ледности оказалась на достаточно низком уровне – на уровне средней части изоповерхности W=10 м/с. Можно еще заметить, что из облака выпадают осадки в виде града. Сравнение рисунков 3.47 и 3.48 показывает, условия для взаимодействия кристаллов и капель в облаке достаточно благоприятные при втором варианте распределения по

высоте скорости ветра в атмосфере. Этим, видимо, можно объяснить увеличение ледности в облаке во втором варианте расчетов.

Переохлажденные капли при этом переносятся восходящими потоками в зону роста кристаллов. Зона выпадения кристаллов располагается справа от зоны восходящих потоков, т.е. схема образования и роста ледяной фазы в облаке совпадает с полученной ранее в работе [31] с помощью двумерной модели.

Полученные результаты исследования формирования полей различных параметров в облаке в зависимости от распределения горизонтального ветра в атмосфере, были дополнены результатами сравнительного анализа изменений максимальных значений их параметров. Результаты такого анализа повышают достоверность полученных результатов, дают новую информацию о влиянии структуры ветра в атмосфере на образование и развитие этих облаков. Кроме этого, они позволяют сравнивать различные характеристики этих облаков, к которым, например, относится и градоопасность.

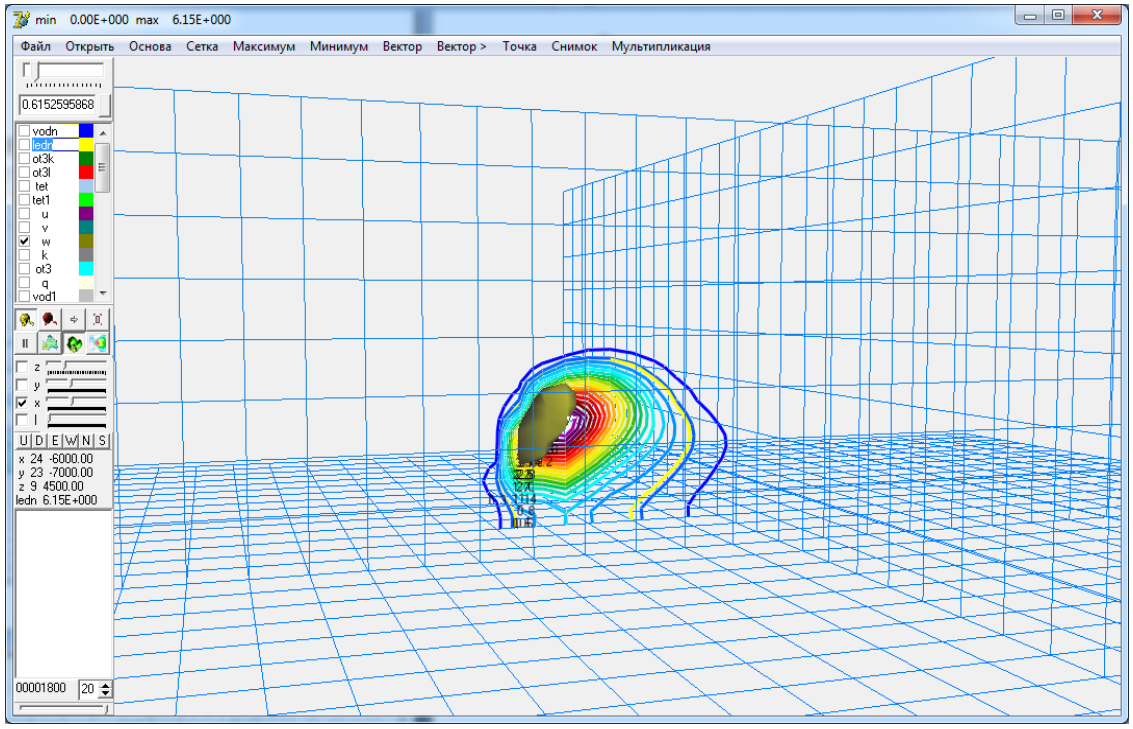


Рисунок 3.48 - Изолинии ледности. Изоповерхность W=10 м/с.

Для проведения такого анализа влияния структуры горизонтального ветра в атмосфере на характер развития конвективных облаков была построена таблица 3.1, в которой приводятся максимальные значения параметров облаков, полученных выше в результате расчетов и соответствующих различным вариантам распределения ветра в атмосфере (07.06.2012 г.).

В данной таблице используются следующие обозначения: W_E и $W_н$ – максимальные значения скорости восходящих и нисходящих потоков воздуха, HW_E – уровень, на котором располагается максимальное значение скорости восходящих потоков воздуха, Qmax, QLmax, Zmax – максимальные значения водности, ледности и отражаемости в облаке, HQmax, HQLmax, HZmax – вертикальные координаты максимальных значений водности, ледности и отражаемости.

Таблица 3.1- Максимальные значения параметров облака, соответствующих различным вариантам распределения ветра в атмосфере (07.06.2012 г.).

	I- вариант - направление ветра не меняется по высоте			II-вариант - направление ветра меняется по высоте		
Время, мин	20	30	40	20	30	40
W_E, м/с	15,2	17,1	16,4	17,3	16,4	13,7
$W_н$, м/с	-1,78	-1,8	-2,4	-1,86	-2,26	-1,91
H W_E , км	4	5	5	4	4,5	4,5
Qmax, г/м3	5,48	9,02	9,95	5,78	7,77	3,43
HQmax, км	4,5	4,5	3,5	4,5	4,0	3,0
QLmax	$3*10^{-4}$	4,63	3,80	$5*10^{-4}$	3,94	6,15
HQLmax, км	5,5	6,5	6,0	5,5	6,5	4,5
Zmax, dBZ	17,5	65,5	66,2	17,5	17,5	60,8
HZmax, км	4,5	4,5	3,5	4,5	4,0	4,0

Остановимся на результатах сравнительного анализа приведенных в таблице данных. Максимальное значение скорости вертикальных потоков, как можно заметить, на 30-й и 40-й минутах развития облака выше в случае, когда направление ветра не меняется по высоте, а на 20-й минуте оно больше во втором случае (в случае, когда направление ветра меняется по высоте). Другая картина наблюдается в динамике максимального значения скорости нисходящих движений воздуха: на 20-й и 30-й минутах развития облака оно больше во втором случае, а на 40-й минуте – в первом случае. Что касается высот, на которых наблюдается максимальное значение данного параметра, то в обоих случаях они одинаковы и равны 4 км на 20-й минуте развития облака, а на 30-й и 40-й минутах в первом случае они расположены выше на 0.5 км.

Важную роль в образовании и развитии облаков, включая и процессы осадкообразования в них, играет величина водности, в частности, ее максимальное значение. Из таблицы видно, что в случае, когда направление ветра не меняется с высотой, максимальное значение водности в облаке заметно больше, чем когда оно меняется с высотой. Это свидетельствует о том, что концентрация и размеры капель выше в облаке, образовавшемся при неизменном направлении ветра в атмосфере. Можно еще заметить, что в этом случае данный параметр располагается на более высоких уровнях, чем во втором случае.

Что касается максимального значения ледности, то на 20-й минуте оно незначительно в обоих вариантах развития облака, хотя во втором случае оно несколько выше, чем в первом. На 30-й минуте оно заметно больше в первом случае, а на 40-й минуте, наоборот, во втором случае оно стало больше, чем в первом. С учетом значений максимальной водности и уровней, на которых они находятся в облаке, можно отметить, что в случае, когда направление ветра не меняется с высотой, условия для роста кристаллов и образования градин являются более благоприятными.

Об этом может свидетельствовать соотношение значений максимальной отражаемости в различные моменты развития облака в случаях, когда

направление ветра не меняется по высоте и когда оно остается неизменным. В первом случае наблюдается устойчивое увеличение значения данного параметра, а во втором случае увеличение оно наблюдается на 40-й минуте. Кроме этого, что важно с точки зрения сравнения процессов осадкообразования, максимальное значение отражаемости на всем рассматриваемом отрезке времени значительно больше в случае, когда направление ветра не меняется с высотой.

Значения этих же параметров облака за 02.06.2010г, соответствующие реальной (слева) и модельной (справа) структуре ветра в атмосфере, приводятся в таблице 3.2 .

Таблица 3.2 - Максимальные значения параметров облака, соответствующих различным вариантам распределения ветра в атмосфере (02.06.2010г.).

	I-вариант - направление ветра не меняется по высоте			II - вариант - направление ветра меняется по высоте		
Время, мин	20	30	40	20	30	40
Wmax, м/с	44,4	39,3	39,0	17,9	12,8	7,9
HWmax, км	6,5	7,0	6,75	3,5	5,0	5,0
Qmax, г/м3	11,8	11,1	10,9	6,63	8,7	6,9
HQmax, км	7,0	6,75	6,5	4,75	5,25	4,5
Zmax, dBZ	60,0	62,8	66,6	37,6	64,7	64,3
HZmax, км	6,5	6,0	5,5	4,25	5,25	3,75

Из таблицы видно, что, как и в предыдущем случае, максимальные значения скорости восходящих потоков на разных этапах развития облака значительно больше в случае, когда направление ветра не меняется с высотой. Что касается высот, на которых они располагаются, то в первом варианте они заметно выше, чем во втором.

Что касается остальных параметров облака, то в случае, когда направление ветра не меняется по высоте их значения заметно больше, чем во втором случае. Обращает на себя внимание соотношение максимальных значений водности и ледности в этих случаях. В первом случае их значения заметно выше, чем в случае, когда направление ветра меняется по высоте.

Таким образом, на основе полученных результатов можно утверждать, что структура ветра в атмосфере является фактором, оказывающим существенное влияние на процессы облакообразования. По результатам расчетов характеристик облака с поворотом направления ветра и без такового в одной и той же синоптической ситуации имело место усиление параметров облака при отсутствии поворота ветра с высотой, т.е. наличие поворота ветра с высотой является фактором, препятствующим образованию и развитию конвективных облаков.

Остановимся на интерпретации полученной зависимости процессов облакообразования от структуры ветра в атмосфере. Объяснение этой зависимости на качественном уровне, по нашему мнению, не встречает трудностей, если учесть что, характер взаимодействия облака с окружающей атмосферой и интенсивность перемешивания облака с атмосферным воздухом зависят от структуры ветра в атмосфере. В случае, когда скорость ветра в атмосфере на всех высотах направлена в одну сторону (первый из рассмотренных случаев), взаимодействие восходящих потоков с атмосферой происходит менее интенсивно, в облако поступает воздух из нижних слоев атмосферы. А в случае, когда направление ветра меняется с высотой (второй случай), взаимодействие между восходящими потоками и атмосферой происходит более интенсивно, что препятствует развитию интенсивных восходящих потоков. Кроме этого, в облако в этом случае поступает больше воздуха с более высоких слоев атмосферы, в которых температура и влажность ниже, чем в нижних слоях атмосферы. Это также препятствует развитию мощных восходящих движений воздуха в облаке и, таким образом, развитию самого облака.

Поэтому в случае, когда направление ветра в атмосфере было одинаковым на всех высотах, в результате расчетов было получено облако большей мощности, в котором скорости восходящих потоков воздуха, значения водности и других параметров были больше, чем при наличии поворота ветра с высотой.

3.6 О взаимодействии динамических, микрофизических и электрических процессов в конвективных облаках

Как было отмечено, основное усилие на новом этапе развития физики конвективных облаков должно быть уделено исследованию роли взаимодействия процессов в облаках и облаков с атмосферой в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. В связи с этим были проведены численные эксперименты по исследованию образования и развития конвективных облаков в естественных условиях и влияния взаимодействия процессов на формирование их макро- и микроструктурных характеристик.

Цель первого направления заключается в исследовании образования и развития конвективных облаков с использованием реальных данных зондирования атмосферы. При этом прослеживается трансформация в пространстве и во времени достаточно широкого круга макро- и микрофизических параметров облаков. Результаты таких исследований дают представление о закономерностях развития облаков в целом с учетом взаимосвязи между процессами и их взаимодействия с атмосферой, позволяют анализировать существующие представления о закономерностях трансформации макро- и микроструктурных характеристик облаков путем сравнения с результатами моделирования.

Исследования по второму направлению можно считать началом второго этапа исследований конвективных облаков, а полученные результаты являются новыми в физике конвективных облаков. В этом направлении впервые исследовались:

- влияние электрических процессов на образование и развитие конвективных облаков;

- влияние структуры ветра в атмосфере на формирование макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков;

- роль деформации полей термодинамических параметров в облаках, которая является результатом взаимодействия процессов гидротермодинамики и микрофизики, в формировании их макро- и микроструктурных характеристик.

На основе исследований с применением разработанной трехмерной модели показано, что важную роль в образовании осадков в мощных конвективных облаках играет взаимодействие динамических, термодинамических и микрофизических процессов. Вследствие деформации полей термодинамических параметров облака под влиянием восходящих потоков и в результате динамического взаимодействия с воздушными потоками в облаке формируется зона, в которой происходит рост частиц осадков, при этом время нахождения частиц в этой зоне увеличивается.

В данной работе исследовано сложное взаимодействие электрических и микрофизических процессов с наличием обратной связи между ними. Так, электрические поля в облаке зависят от числа и зарядов частиц, а частицы, находящиеся в электрическом поле, электризуются, и на коэффициент коагуляции образовавшихся частиц влияет их заряд и напряженность поля. Растрескивание замерзающих капель сопровождается электризацией разлетевшихся осколков, что приводит к образованию поля в облаке, влияющего на коэффициент столкновений частиц и на скорость образования осадков.

В работе исследовано формирование положительного и отрицательного объемных электрических зарядов, рассчитаны характеристики электростатического поля. Расчетные значения напряженности электростатического поля применены в модели для корректировки коэффициента коагуляции облачных частиц. Значение коэффициента слияния

частиц с увеличением напряженности возрастают и могут существенно превышать единицу. Определено, что за счет электрической коагуляции время роста частиц осадков уменьшается в мощном конвективном облаке примерно на 30%.

Полученные в работе результаты, относящиеся к взаимодействию частиц, размером ниже предела 19 мкм, согласуются с результатами, полученными в экспериментальных исследованиях [103], в которых наблюдалось заметное увеличение (10 %) числа капель радиусами 25-45 мкм при высоковольтных разрядах, тогда как в отсутствие разрядов размер крупных капель составлял 7-15 мкм.

Сравнение времени образования осадков без учета и с учетом электрической коагуляции показало, что во втором случае осадки начинаются на 5-7 минут раньше. Напряженности электрического поля при учете электрической коагуляции растут быстрее, чем без ее учета. В частности, на 40-й минуте развития облака E_z без учета электрической коагуляции составляла 240 В/см, а при учете – 650 В/см.

Появляются изменения и в спектрах ледяных частиц (рисунок 3.21). В спектрах наблюдаются смещения в сторону крупных частиц.

Экспериментально и теоретически изучалось влияние электрических сил на облачные микрофизические процессы [35,77,80]. В сильных электрических полях капли могут вытягиваться и разрушаться, под действием электрических сил, меняются условия столкновения и слияния частиц облаков и осадков, под влиянием электрических сил на частицах наблюдается усиленный рост инея, электрические силы в какой-то мере отражаются на вероятности замерзания капель.

Вследствие взаимодействия облачных частиц радиусами до 20 мкм, которое становится возможным при наличии зарядов на частицах и значительных электрических полей в облаке (E>50 В/см), в выполненных численных экспериментах наблюдалось ускорение процесса роста частиц осадков и увеличение электрического поля облака.

Таким образом, в мощных конвективных облаках взаимодействие микрофизических и электрических процессов играет важную роль.

Выводы к главе

На основе разработанной трехмерной модели облака с учетом электрических процессов получены следующие новые важные результаты:

Получена картина формирования электрической структуры облака в процессе его эволюции. Исследовано формирование положительного и отрицательного объемных электрических зарядов в конвективном облаке.

Определены количественные характеристики объемного заряда, потенциала, напряженности электростатического поля на разных стадиях развития облака.

Проанализировано взаимодействие микроструктурных и электрических параметров в мощных конвективных облаках. В облаке наблюдается положительная обратная связь между ростом массы ледяных частиц и объемным электрическим зарядом.

Исследовано влияние электрической коагуляции на скорость образования осадков. Определено, что за счет электрической коагуляции время роста частиц осадков уменьшается в мощном конвективном облаке примерно на 30%.

По результатам моделирования получено, что на стадии максимального развития конвективного облака за счет электрической коагуляции происходит наиболее интенсивный рост жидких и твердых осадков.

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 в меньшей степени, более заметно оно влияет на наклон данной зоны к горизонту и в меньшей степени на форму и параметры этой зоны. Существенно влияет данный фактор и на формирование полей микроструктурных параметров конвективных облаков. Влияние ветра в атмосфере на формирование зон локализации водности и ледности уменьшается с увеличением значений этих параметров. Усложнение структуры поля ветра в атмосфере является фактором, препятствующим образованию и развитию конвективных облаков.

Глава 4

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНВЕКТИВНЫЕ ОБЛАКА

В главе представлены результаты численных экспериментов по моделированию АВ на конвективные облака с целью искусственного увеличения осадков и АВ на градовые облака.

Исследовалось влияние на формирование микроструктурных параметров облаков наличия источников искусственных ледяных кристалликов. В экспериментах варьировались: концентрация искусственных кристаллов, место внесения, момент воздействия. Определена эффективность различных вариантов внесения реагента. Разработаны рекомендации по усовершенствованию параметров засева.

4.1 Проблема активных воздействий на облака с целью искусственного увеличения осадков

Проблема искусственного увеличения осадков имеет важное значение во многих регионах 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.

Анализ проектов по искусственному увеличению осадков показывает, что в работах по активному воздействию имеется ряд нерешенных проблем, относящихся к планированию экспериментов, оценке их результатов, к выбору ситуаций, благоприятных для воздействия.

В ходе многолетних опытных и производственных работ по ИУО разрабатывались и совершенствовались методы и средства активных воздействий на облака [49,67,72,88]. В результате наработок была издана методическая литература, в которой излагались принципы, организация и

методика проведения работ по ИУО, вопросы оценки эффекта воздействия и другое.

В мировой практике активных воздействий на переохлажденные облака наиболее распространенными кристаллизующими реагентами в настоящее время являются йодистое серебро, твердая углекислота и жидкий азот [88].

Ввод в облака кристаллов йодистого серебра с самолета осуществляется двумя способами.

1. Распыление под основанием облаков или непосредственно в облаках на уровнях, где его льдообразующая эффективность достаточно высока или максимальна. Реагент диспергируется путем сжигания в специальной горелке ацетонового раствора AgJ.

2. Отстрел в вершины облаков подожженных пиротехнических шашек (пиропатронов). Сгорая в процессе падения в толще облака, они выделяют большое количество кристаллов йодистого серебра в переохлажденный облачный объем.

Физика воздействия на облака с целью искусственного увеличения осадков так или иначе опирается на механизм Бержерона [49,87] образования дождя в смешанных облаках через твердую фазу, т.е. с участием ледяных кристаллов.

Из-за малочисленности естественных льдообразующих ядер облачные капельки часто остаются переохлажденными при температурах почти до –40 ^{o}C. Ледяная частица, введенная в переохлажденное облако каким-либо способом, быстро растет за счет сублимации, поскольку давление окружающего пара эквивалентно насыщенному по отношению к воде.

За счет присутствия ледяных кристаллов содержание жидкой воды в облаке сокращается из-за перегонки водяного пара с капель на кристаллы. Если запасы имеющейся переохлажденной воды не пополняются вследствие дальнейшего охлаждения воздуха, вызываемого, например, подъемом в восходящем потоке конвективного облака, то смешанные капельно-кристаллические облака по мере испарения водяных капелек и осаждения

водяного пара на ледяных кристаллах стремятся превратиться в кристаллические.

Моделирование процесса Бержерона с учетом роста ледяных частиц, как в результате осаждения, так и в результате аккреции показывает, что введение 10^5 ледяных частиц на 1 л кристаллизует типичное облако всего за 1-2 мин. Однако, введение 1-10 ледяных частиц на 1 л обеспечивает дальнейший рост ледяных частиц в течение приблизительно 20 мин, прежде чем облачная вода будет полностью использована [49]. К этому моменту ледяные частицы обычно превращаются в снежинки или небольшие градины.

Однако процесс Бержерона не обязательно приводит к выпадению снега на поверхность земли. Во многих случаях осадкообразование в результате процесса Бержерона приводит к выпадению на землю дождя, так как снежинки, крупа или град тают после прохождения через изотерму 0 ^{o}C.

Стоит отметить следующее: мокрые снежинки при температуре около 0 ^{o}C стремятся образовать крупные агрегаты. Дождевые капли, образующиеся в результате таяния твердых гидрометеоров, как правило, бывают крупнее капель, образующихся в результате коагуляции [87].

Процесс Бержерона наблюдается на всем земном шаре и преобладает в средних и высоких широтах. Даже в тропиках многие грозовые облака располагаются выше изотермы 0 °C. Однако считается, что в большинстве тропических облаков дождь образуется сначала в результате коагуляции и, что процесс Бержерона активно вмешивается в осадкообразование только на более поздних стадиях жизни облаков.

Этот механизм формирования частиц осадков послужил теоретическим обоснованием современных методов воздействия на переохлажденные облака и туманы.

Основным принципом воздействия на облака является принцип управления неустойчивыми состояниями, имеющими место в атмосфере и в облаках при определенных условиях [67]. К таким состояниям относятся, прежде всего, термодинамическая неустойчивость атмосферных слоев и

неустойчивость фазового состояния совокупности переохлажденных облачных капель. В неустойчивых системах достаточно воздействовать малым импульсом, чтобы начался самопроизвольный процесс, развивающийся за счет внутренних механизмов.

В настоящее время существуют две основные концепции засева облаков льдообразующими реагентами с целью увеличения осадков.

Микрофизическая концепция засева облака заключается в том, что внесение реагента в облако приводит к изменению микрофизических параметров облака (водность, концентрация и размер частиц, количество осадков), при этом геометрические размеры облака не изменяются. Микрофизическая концепция засева исходит из возможности увеличения осадков за счет уменьшения выноса влаги в наковальню и более эффективного превращения мелкокапельной влаги в осадки [67].

Динамическая концепция засева основана на предположении, что в результате воздействия на переохлажденную часть облака реагентом в количестве от 10^5 м $^{-3}$ и более она нагревается за счет выделения скрытой теплоты фазовых переходов, что приводит к увеличению скорости восходящих потоков и к изменению геометрических размеров облака (высоты, площади). Разумеется при наличии определенной неустойчивости в атмосфере.

Обычно самолеты оборудуются одним или двумя видами устройств для отстрела пиропатронов с йодистым серебром, устройствами сброса углекислоты и устройствами распыления жидкого азота.

В ПВ-26 масса выстреливаемой пиротехнической шашки составляет 33 г. Продолжительность горения пиросостава равна приблизительно 40 с, а протяженность трассы горения - 1500 метров.

Для засева облаков твердой углекислотой используются несколько видов самолетных автоматических устройств, позволяющих осуществлять дозированный (от 0,1 до 10 кг/мин) сброс в облака гранул CO_2 (с размерами 0,2-1,0 см.

Несмотря на широкое развитие работ по проблеме ИУО, до сих пор не решены многие важные вопросы, связанные с ней [49,72,87]. Отсутствуют физически обоснованные и статистически подтвержденные критерии пригодности различных типов облачности для воздействия. Не разработаны объективные методы количественной оценки эффективности воздействия в единичных опытах. Не разработана оптимальная технология воздействий на различные типы облаков.

Все эти проблемы связаны с крайней сложностью и недостаточной изученностью самого объекта воздействий и исследований, которым являются облака. Большое разнообразие облачных форм и присущих им микрофизических и мезомасштабных характеристик, недостаточная изученность закономерностей формирования микроструктуры облаков, их пространственная неоднородность и изменчивость во времени затрудняют исследование изменений, происходящих в облаке в результате активных воздействий.

В связи с отмеченными трудностями, наиболее перспективным методом исследования эволюции параметров облаков при различных условиях является численное моделирование. Применение моделей позволяет проанализировать влияние различных способов внесения реагентов в разные части облака на ход процессов осадкообразования, не прибегая к сложным и спорным натурным экспериментам.

Оценка эффекта воздействия проводилась с помощью численных моделей в работах [23,24,27,40,41,45,46,52,56,73,98,117,176,177,195, 217,222,225,227,229,245,276] и многих других.

Одним из наиболее распространенных методов учета в моделях воздействия является добавление искусственных кристаллов в соответствующую часть спектра ледяных частиц в течение некоторого времени (нескольких минут). Далее естественные и искусственные кристаллы эволюционируют вместе.

Работе кристаллизующего реагента (AgI) ставится в соответствие гетерогенный механизм образования искусственных кристаллов. К возможным механизмам нуклеации для частиц реагента AgI относятся [49]:

1) осаждение (нуклеация путем сублимации) – переход пара в твердое состояние при появлении пересыщения надо льдом;

2) контактная нуклеация – кристаллизация происходит при контакте частицы реагента с переохлажденной каплей;

3) конденсационное замерзание (иногда называемое сорбцией) – конденсация водяного пара на поверхность ядра с последующей кристаллизацией при наличии пересыщения над водой;

4) объемное замерзание (иммерсионная нуклеация) – активация частиц, предварительно собранных каплей и полностью в нее погруженных.

При моделировании льдообразующего засева облаков в работе [40] считалось, что при этом в облаке возникают ядра типа конденсация - замерзание и контактные ядра замерзания. Учитывались: засев восходящего потока с помощью самолетного генератора, ввод реагента в переохлажденную часть облака с помощью пиропатронов, ракет или снарядов. Для выхода ледяных зародышей на 1 г AgI задавалось значение 10^{14} $г^{-1}$. Расчетные выражения включают площадь поперечного сечения облака на уровне засева, dm/dt – расход реагента, Δz – шаг по высоте.

Для моделирования засева в модель добавляют уравнения переноса и нуклеации для частиц реагента. Естественные и искусственные частицы рассматриваются отдельно из-за различия в их химической природе. Это позволяет проследить историю искусственно созданных облачных частиц.

Заинтересованность в атмосферных осадках в мире сильно возросла в последние годы из-за региональных особенностей, роста численности людей на планете, дефицита пресной воды.

Исходя из значительной актуальности проблемы ИУО, адаптация разработанных методов активных воздействий на облака к нуждам сельского хозяйства, МЧС, других служб, уточнение действующих методических

указаний, требуют проведения дальнейших, как экспериментальных, так и теоретических исследований на основе хорошо отработанных математических моделей.

В качестве примера научного подхода к проблеме регулирования атмосферных осадков следует привести хорошо организованный конкурс работ по усилению осадков, проводимый с 2015 г. Национальным центром метеорологии и сейсмологии Объединенных Арабских Эмиратов.

Таким образом, актуальным является исследование и адаптация существующих методик воздействия с целью ИУО и оценки физического эффекта засева, с использованием разработанной автором данной работы модели.

4.2 Применение трехмерной модели для исследования вопросов искусственного увеличения осадков

Методы активного воздействия на облака нуждаются в научном обосновании, в частности, на основе численного моделирования эволюции их микроструктуры при естественном развитии и при засеве реагентами.

Разработанная численная трехмерная модель конвективного облака достаточно адекватно описывает объект моделирования, поэтому, она может быть применена для исследования эффективности методов ИУО, наряду с другими моделями с детальным описанием микрофизических процессов.

По результатам численных экспериментов в диссертации была проведена оценка эффекта различных вариантов АВ.

В качестве основных характеристик для оценки эффекта воздействия использовались: количество осадков, выпадающих на подстилающую поверхность, максимальная интенсивность осадков, высота верхней границы облаков, радиолокационная отражаемость, скорость восходящих потоков.

В данной работе предложен следующий функционал: суммарная масса частиц осадков, находящихся в облаке за время эволюции

$$F[u] = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} \int_{m_k}^{\infty} \int_0^{T} \mathrm{m}(\mathrm{f}_1(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{z},\mathrm{m},\mathrm{t}) + \mathrm{f}_2(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{z},\mathrm{m},\mathrm{t}))\,\mathrm{dxdydzdmdt} \quad , \qquad (4.1)$$

где u – управляющая функция, описывающая источник искусственных частиц в облаке, $f_1(x,y,z,m,t)$, $f_2(x,y,z,m,t)$ – функции распределения по массам капель и ледяных кристаллов, m_k – пороговая масса между каплями осадков и облачными каплями, которые не выпадают на землю.

В качестве входных параметров использовались данные атмосферного зондирования на территории Ставропольского края (аэропорт Минеральные Воды), Кабардино-Балкарской республики (научно-исследовательский полигон Высокогорного геофизического института «Кызбурун-2»), Московский регион (г.Долгопрудный) за весенне-летний и осенний периоды.

Ниже приведены результаты расчетов для нескольких обработанных зондов. Для каждого случая был выполнен расчет естественного развития облака и несколько вариантов с воздействием, в которых варьировались уровень внесения реагента и его концентрация. Моделировалось активное воздействие кристаллизующим реагентом. Естественный ход эволюции параметров облака применялся в качестве опорного варианта для сравнений. Примеры расчета микроструктурных параметров облака приведены на рисунках 4.1.-4.4.

Момент воздействия составлял $t_{возд}$=20 – 30 мин от начала развития облака. Температура внесения реагента варьировалась в пределах –3 ÷ –12 ^{o}C, концентрация искусственных ледяных кристаллов – от 10^3 до 10^7 м$^{-3}$. Результаты расчетов активного воздействия на облака для наиболее эффективных температурных уровней приведены в таблицах 4.1-4.8.

Контролировалось изменение под влиянием воздействия следующих параметров: мощности облака (ΔH), максимального значения вертикальной скорости (W) и ее уровня (H_{Wmax}), дополнительное количество осадков (ΔQ),

относительное увеличение осадков в результате воздействия ($\Delta Q/Q \cdot 100\%$), эффективность осадкообразования ($К_{осадк}$) и время эволюции облака ($Т_{эволюц}$).

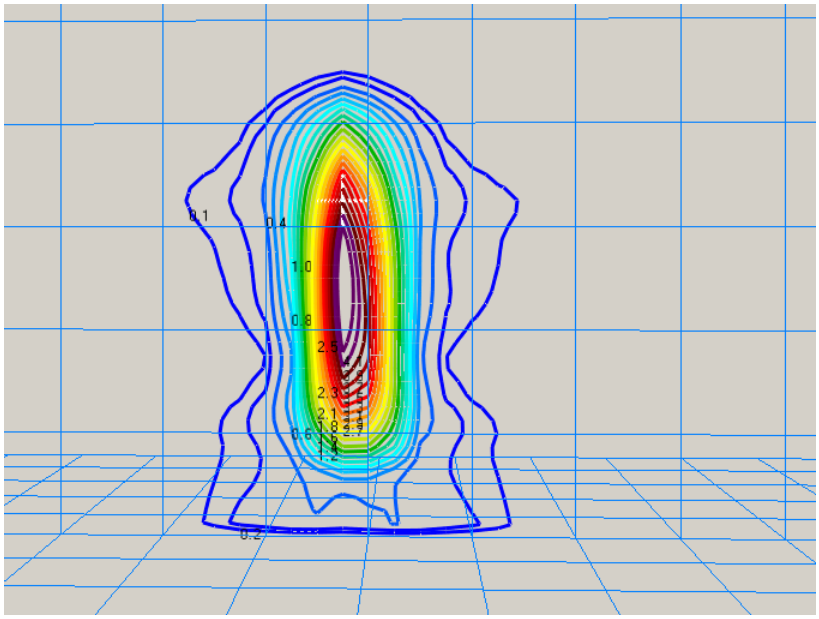


Рисунок 4.1 - Вертикальный разрез облака: изолинии водности на 40-й минуте развития облака. Максимум составляет 4,5 г/м^3.

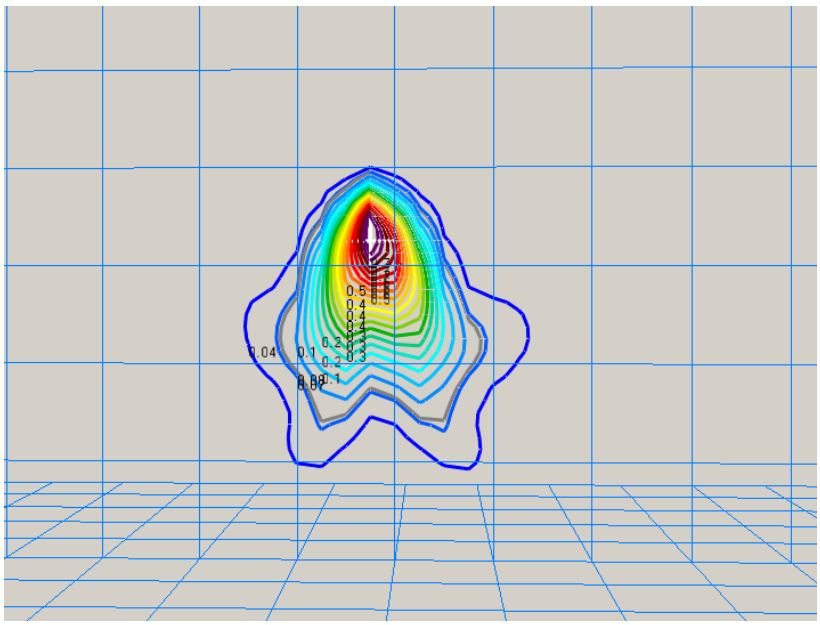


Рисунок 4.2- Вертикальный разрез облака: изолинии капель средних размеров (100-500 мкм) на 40-й минуте развития облака. Максимум составляет 0,82 г/м^3.

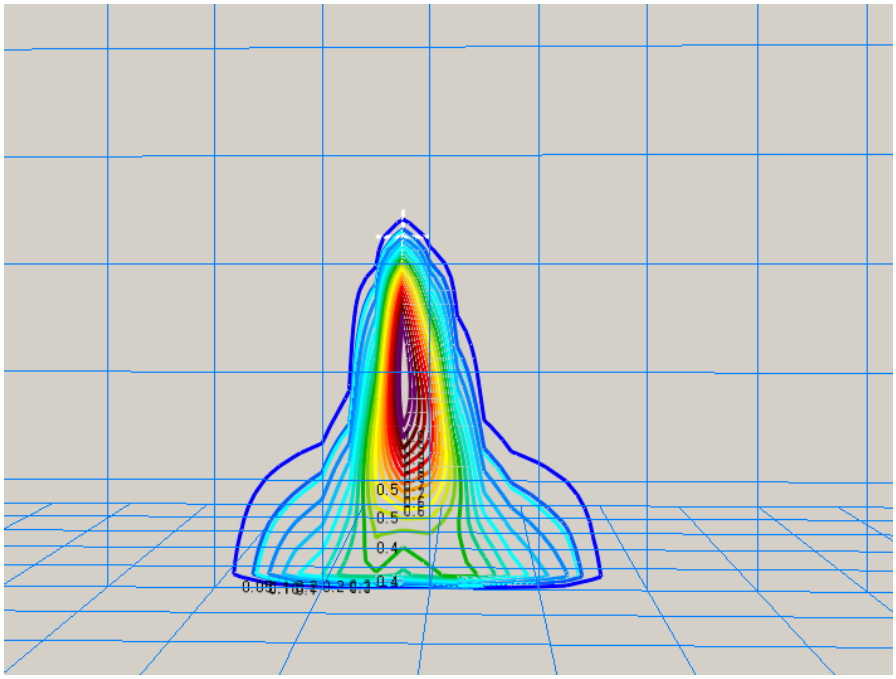


Рисунок 4.3- Вертикальный разрез облака: изолинии крупных капель (d> 500 мкм) на 40-й минуте развития облака. Максимум составляет 1,1 г/м^3. В нижней части облака присутствуют частицы осадков, которые устремляются к земле.

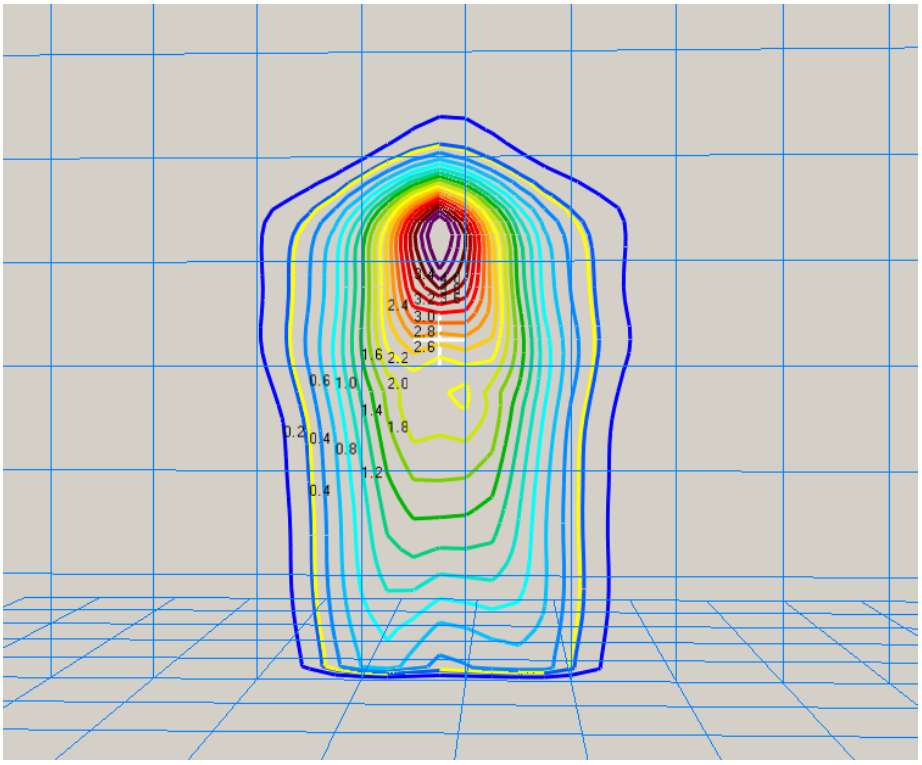


Рисунок 4.4 - Вертикальный разрез облака: изолинии ледности на 40-й минуте развития облака. Максимум составляет 4,4 г/м^3.

Рассмотрим некоторые из расчетных вариантов активного воздействия на конвективные облака с помощью кристаллизующих реагентов.

Вариант 1.

В первом варианте моделирования активных воздействий на конвективные облака использовались данные зондирования по аэропорту Минеральные Воды от 26.07.86 9.00 ч. Было промоделировано воздействие на облако кристаллизующим реагентом с различной концентрацией и на разных температурных уровнях. Полученные результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты расчетов активного воздействия на конвективное облако по данным зонда от 26.07.86г

Параметры /Вариант	1	2	3	4	5	6
H внесения (м)	4700	4700	4700	5300	5300	5300
t внесения ^{0}C	-6.3	-6.3	-6.3	-10.6	-10.6	-10.6
Расход реагента ($м^{-3}$)	$1*10^4$	$5*10^4$	$1*10^5$	$1*10^4$	$5*10^4$	$1*10^5$
Характеристики облака						
Верхняя граница (м)	7610	7960	8160	7610	7960	8160
Мощность (м)	6150	6500	6700	6150	6500	6700
Время эволюции (мин)	56	58	59	56	58	59
W вертик. скор. (м/с)	12.01	12.32	13.53	12.01	12.01	12.42
Уровень макс. скор. (м)	4360	5960	6010	4360	4360	6260
Эффект. осадкообр. (%)	18.1	19.1	20.7	18.1	18.8	19.6
ΔW (м/с)						
Абс.изм.кол-ва осад.(мм)	1.07	2.07	3.72	1.07	1.77	2.58
Относ.изм.кол.осад. (%)	6.3	12.2	21.9	6.3	10.4	14.2

Вариант 2.

Второй вариант расчетов активного воздействия на облако выполнен по данным зондирования 04.06.89 Кызбурун-2 12.00.

Характеристики уровня конденсации по данным расчетов таковы: высота 490 м, давление 922 мб, температура 19,7 ^{o}C. Температурные уровни в атмосфере составляли: 0 ^{o}C -3210 м; -6 ^{o}C - 4320 м; -10 ^{o}C - 5240 м; -15 ^{o}C - 6560 м; -25 ^{o}C - 7550 м; -40 ^{o}C -9270м.

Рассчитаны варианты воздействия на данное облако кристаллизующим реагентом с различной концентрацией и на разных температурных уровнях. Полученные результаты представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты расчетов активного воздействия на конвективное облако по данным зонда от 04.06.89г

Параметры /Вариант	1	2	3	4	5	6
H внесения (м)	4300	4300	4600	5300	5300	5300
t внесения ^{0}C	-4.9	-4.9	-4.9	-10.2	-10.2	-10.2
Расход реагента ($м^{-3}$)	$1*10^{4}$	$5*10^{4}$	$1*10^{5}$	$1*10^{4}$	$5*10^{4}$	$1*10^{5}$
Характеристики облака						
Верхняя граница (м)	6190	6840	11090	6090	6590	11140
Мощность (м)	5700	6350	10600	5600	6100	10650
Время эволюции (мин)	54	57	84	53	56	85
W вертик. скор. (м/с)	14.47	16.06	16.91	14.47	14.47	18.21
Уровень макс. скор. (м)	4090	5040	10190	4090	4090	10190
Эффект. осадкообр. (%)	19.7	22.8	33.8	19.5	20.5	34.5
ΔW (м/с)						
Абс.изм.кол-ва осад.(мм)	0.29	3.34	14.33	0.09	1.06	16.03
Относ.изм.кол.осад. (%)	1.5	17.2	73.7	0.5	4.5	82.5

Вариант 3.

В этом варианте моделирования активных воздействий на конвективные облака использовались данные зондирования Московская область, г.Долгопрудный от 07.05.2015 3.00 ч.

Характеристики уровня конденсации по данным расчетов: высота 730 м, давление 934 мб, температура 6,5 ^{o}C. Температурные уровни в атмосфере составляли: 0 ^{o}C - 1770 м; - 6 ^{o}C - 2730 м; -10 ^{o}C - 3370 м; -15 ^{o}C - 4170 м; -25 ^{o}C - 5770 м; -40 ^{o}C - 8170м. Вертикальный разрез облака в момент начала воздействия приведен на рисунке 4.5. Параметры модельного облака при естественном развитии и активном воздействии представлены в таблице 4.3.

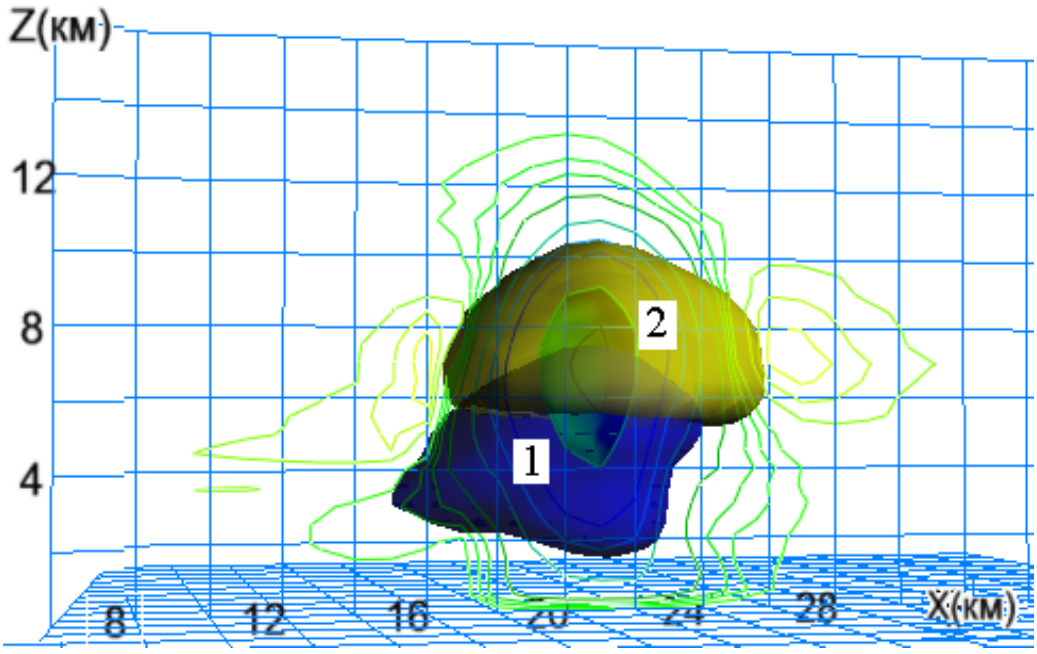


Рисунок 4.5 - Вертикальный разрез облака на 30-й минуте развития.

Приведены: изолинии вертикальной скорости; 1 –изоповерхность водности; 2 – изоповерхность ледности.

Таблица 4.3 - Результаты расчетов активного воздействия на конвективное облако по данным зонда от 07.05.2015 г.

Параметры /Вариант	Ест.ход	1	2	3	4	5	6
H внесения, (м)	-	2730	2730	2730	3370	3370	3370
t внесения , (°C)	-	-6	-6	-6	-10	-10	-10
Расход реагента, ($м^{-3}$)	-	10^4	10^5	10^6	10^4	10^5	10^6
Характеристики обл.							
Верхняя граница (м)	7280	7880	8830	9630	7780	8680	9430
Мощность (м)	6550	7150	8100	8900	7050	7950	8700
ΔH (м)	0	600	1550	2350	500	1400	2150
Уровень макс.ск. (м)	3680	4230	4830	5130	4430	5030	5430
W вертик. скор. (м/с)	21,3	23,1	26,9	30,4	22,3	25,4	28,6
ΔW (м/с)	0,0	1,8	5,6	9,1	1,0	4,1	7,3
Время эвол. (мин)	58	62	67	73	61	66	71
Макс.инт.осад.(мм/ч)	26,8	30,1	37,2	44,1	29,0	34,8	40,9
Кол. осадков (мм)	8,9	10,0	12,4	14,7	9,7	11,6	13,6
Абс.изм.. (мм)	0,0	1,1	3,5	5,8	0,7	2,7	4,7
Относ.изм. (%)	0,0	12,5	38,8	64,6	8,2	30,0	52,7

Вариант 4.

Вариант расчетов активного воздействия на облако выполнен на данных зондирования Москва (Долгопрудный) от 16.05.2015 3.00 ч.

Характеристики уровня конденсации по данным расчетов: высота 150 м, давление 994 мб, температура 18,8 ^oC. Температурные уровни в атмосфере составляли: 0 ^oC - 4350 м; - 6 ^oC - 5740 м; -10 ^oC - 6660 м; -15 ^oC - 7820 м; -25 ^oC - 10140 м; -40 ^oC - 13610м.

Моделировалось воздействие на данное облако кристаллизующим реагентом с различной концентрацией и на разных температурных уровнях.

Параметры модельного облака при естественном развитии и полученные результаты представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Результаты расчетов активного воздействия на конвективное облако по данным зонда от 16.05.2015 г.

Параметры /Вариант	Ест.ход	1	2	3	4	5	6
H внесения (м)	-	5740	5740	5740	6660	6660	6660
t внесения (°C)	-	-6	-6	-6	-10	-10	-10
Расход реагента ($м^{-3}$)	-	10^4	10^5	10^6	10^4	10^5	10^6
Характеристики облака							
Верхняя граница (м)	6290	6640	7440	8290	9040	9740	11040
Мощность (м)	6450	6800	7400	8200	8900	9550	10950
ΔH (м)	0	350	950	1750	2450	3100	4500
Уровень макс. скор.(м)	2450	2450	2450	2450	2450	2450	7950
W вертик. скор. (м/с)	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	24,9
ΔW (м/с)	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	6,3
Время эволюции (мин)	58	60	63	68	73	77	87
Макс. инт. осад.(мм/ч)	23,4	24,1	25,2	26,9	28,3	29,8	40,9
Количество осад. (мм)	7,8	8,0	8,4	9,0	9,4	9,9	13,6
Абс.изм.кол-ва ос.(мм)	0,0	0,2	0,6	1,1	1,6	2,1	5,8
Относ.изм.кол.осад.(%)	0,0	2,8	7,7	14,6	21,0	27,1	74,5

Вариант 5.

Вариант расчетов активного воздействия на облако выполнен на данных зондирования Москва (Долгопрудный) от 28.05.2015 15.00 ч.

Характеристики уровня конденсации по данным расчетов: высота 850 м, давление 910 мб, температура 17,1 ^oC. Температурные уровни в атмосфере составляли: 0 ^oC - 4440 м; - 6 ^oC - 5720 м; -10 ^oC - 6570 м; -15 ^oC - 7630 м; -25 ^oC - 9760 м; -40 ^oC - 12960м.

Моделировалось воздействие на данное облако кристаллизующим реагентом с различной концентрацией и на разных температурных уровнях. Параметры модельного облака при естественном развитии и полученные результаты представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Результаты расчетов активного воздействия на конвективное облако по данным зонда от 28.05.2015 г.

Параметры /Вариант	Ест.ход	1	2	3	4	5	6
H внесения (м)	-	5720	5720	5720	6570	6570	6570
t внесения (°C)	-	-6	-6	-6	-10	-10	-10
Расход реагента ($м^{-3}$)	-	10^4	10^5	10^6	10^4	10^5	10^6
Характеристики облака							
Верхняя граница (м)	6290	6640	7440	8290	9040	9740	11040
Мощность (м)	5850	6200	7000	7850	8600	9300	10600
ΔH (м)	0	350	1150	2000	2750	3450	4750
Уровень макс. скор.(м)	2940	2940	2940	2940	2940	7540	8040
W вертик. скор. (м/с)	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	18,2	24,9
ΔW (м/с)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	9,5
Время эволюции (мин)	54	56	61	66	71	75	84
Макс. инт. осад.(мм/ч)	18,9	19,5	21,0	22,7	24,3	28,8	40,0
Количество осад. (мм)	6,3	6,5	7,0	7,6	8,1	9,6	13,3
Абс.изм.кол-ва ос.(мм)	0,0	0,2	0,7	1,3	1,8	3,3	7,0
Относ.изм.кол.осад.(%)	0,0	3,3	11,1	19,9	28,2	52,0	71,3

Вариант 6.

Вариант расчетов активного воздействия на облако выполнен на данных зондирования Москва (Долгопрудный) от 29.05.2015 15.00 ч. Параметры модельного облака при естественном развитии и активном водействии представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Результаты расчетов активного воздействия на конвективное облако по данным зонда от 29.05.2015 г.

Параметры /Вариант	Ест.ход	1	2	3	4	5	6
H внесения (м)	-	5440	5440	5440	6230	6230	6230
t внесения (°C)	-	-6	-6	-6	-10	-10	-10
Расход реагента ($м^{-3}$)	-	10^4	10^5	10^6	10^4	10^5	10^6
Характеристики обл.							
Верхняя граница (м)	7500	8250	9650	10750	8050	9500	10700
Мощность (м)	6650	7400	8800	9900	7200	8650	9850
ΔH (м)	0	750	2150	3250	550	2000	3200
Уровень макс. ск. (м)	4000	4000	7050	7600	4000	4000	8100
W вертик. скор. (м/с)	16,1	16,1	19,3	24,2	16,1	16,1	21,4
ΔW (м/с)	0,0	0,0	3,2	8,1	0,0	0,0	5,3
Время эвол. (мин)	59	63	72	79	62	71	79
Макс. инт.осад.(мм/ч)	21,0	22,5	28,9	37,3	22,1	25,0	33,7
Кол. осадков (мм)	7,0	7,5	9,6	12,4	7,4	8,3	11,2
Абс.изм. (мм)	0,0	0,5	2,6	5,4	0,3	1,3	4,2
Относ.изм. (%)	0,0	6,8	37,3	77,5	5,0	19,0	60,2

Вариант 7.

Вариант расчетов активного воздействия на облако выполнен на данных зондирования Москва (Долгопрудный) от 19.09.2015 15.00 ч.

Характеристики уровня конденсации по данным расчетов: высота 1210 м, давление 881,3 мб, температура 11,0 ^oC. Температурные уровни в атмосфере составляли: 0 ^oC - 2970 м; - 6 ^oC - 3930 м; -10 ^oC - 4570 м; -15 ^oC - 5370 м; -25 ^oC - 6970 м; -40 ^oC - 9370м.

Моделировалось воздействие на данное облако кристаллизующим реагентом с различной концентрацией и на разных температурных уровнях.

Параметры модельного облака при естественном развитии и полученные результаты представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Результаты расчетов активного воздействия на конвективное облако по данным зонда от 19.09.2015 г.

Параметры /Вариант	Ест.ход	1	2	3	4	5	6
H внесения (м)	-	3930	3930	3930	4570	4570	4570
t внесения (°C)	-	-6	-6	-6	-10	-10	-10
Расход реагента ($м^{-3}$)	-	10^4	10^5	10^6	10^4	10^5	10^6
Характеристики облака							
Верхняя граница (м)	8360	8960	9510	10010	10410	10810	11710
Мощность (м)	7150	7750	8300	8800	9200	9600	10500
ΔH (м)	0	600	1150	1650	2050	2450	3350
Уровень макс. скор.(м)	5060	5660	6010	6260	6460	6610	6960
W вертик. скор. (м/с)	18,8	20,9	23,0	25,1	27,0	28,8	32,9
ΔW (м/с)	0,0	2,0	4,2	6,2	8,2	10,0	14,1
Время эволюции (мин)	62	65	69	72	75	77	84
Макс. инт. осад.(мм/ч)	25,0	28,5	32,3	36,1	39,7	43,2	51,7
Количество осад. (мм)	8,3	9,5	10,8	12,0	13,2	14,4	17,2
Абс.изм.кол-ва ос.(мм)	0,0	1,2	2,5	3,7	4,9	6,1	8,9
Относ.изм.кол.осад.(%)	0,0	14,3	29,4	44,5	58,8	73,0	67,1

Вариант 8.

Вариант расчетов активного воздействия на облако выполнен на данных зондирования Москва (Долгопрудный) от 21.09.2015 15.00 ч.

Характеристики уровня конденсации по данным расчетов: высота 1460 м, давление 852,2 мб, температура 12,5 ^oC. Температурные уровни в атмосфере составляли: 0 ^oC - 3380 м; - 6 ^oC - 4310 м; -10 ^oC - 4920 м; -15 ^oC - 5690 м; -25 ^oC - 7230 м.

Промоделировано воздействие на данное облако кристаллизующим реагентом с различной концентрацией и на разных температурных уровнях. Параметры модельного облака при естественном развитии и полученные результаты представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Результаты расчетов активного воздействия на конвективное облако по данным зонда от 21.09.2015 г.

Параметры /Вариант	Ест.ход	1	2	3	4	5	6
H внесения (м)	-	4310	4310	4310	4920	4920	4920
t внесения (°C)	-	-6	-6	-6	-10	-10	-10
Расход реагента ($м^{-3}$)	-	10^4	10^5	10^6	10^4	10^5	10^6
Характеристики облака							
Верхняя граница (м)	9460	10110	10710	11210	11660	12110	13060
Мощность (м)	8000	8650	9250	9750	10200	10650	11600
ΔH (м)	0	650	1250	1750	2200	2650	3600
Уровень макс. скор.(м)	5910	6460	6810	7010	7210	7360	7660
W вертик. скор. (м/с)	20,8	23,3	25,8	28,1	30,2	32,2	36,6
ΔW (м/с)	0,0	2,5	5,0	7,3	9,4	11,4	15,8
Время эволюции (мин)	67	71	75	78	81	85	92
Макс. инт. осад.(мм/ч)	29,0	33,5	38,0	42,4	46,7	50,8	60,7
Количество осад. (мм)	9,7	11,2	12,7	14,1	15,6	16,9	20,2
Абс.изм.кол-ва ос.(мм)	0,0	1,5	3,0	4,5	5,9	7,3	10,6
Относ.изм.кол.осад.(%)	0,0	15,5	31,3	46,5	61,1	75,5	79,4

Были выполнены расчеты по многим зондам. Не останавливаясь подробно на них, отметим что эффект воздействия зависел от стратификации атмосферы, параметров подоблачного слоя, уровня внесения реагента, его концентрации, от момента внесения.

Изменение со временем в одном из расчетов максимальных параметров: высоты облака, скорости восходящих потоков и суммарного количества

осадков, приведены на рисунках 4.6-4.8. При воздействии отмечается увеличение высоты облака, скорости восходящих потоков, суммы осадков.

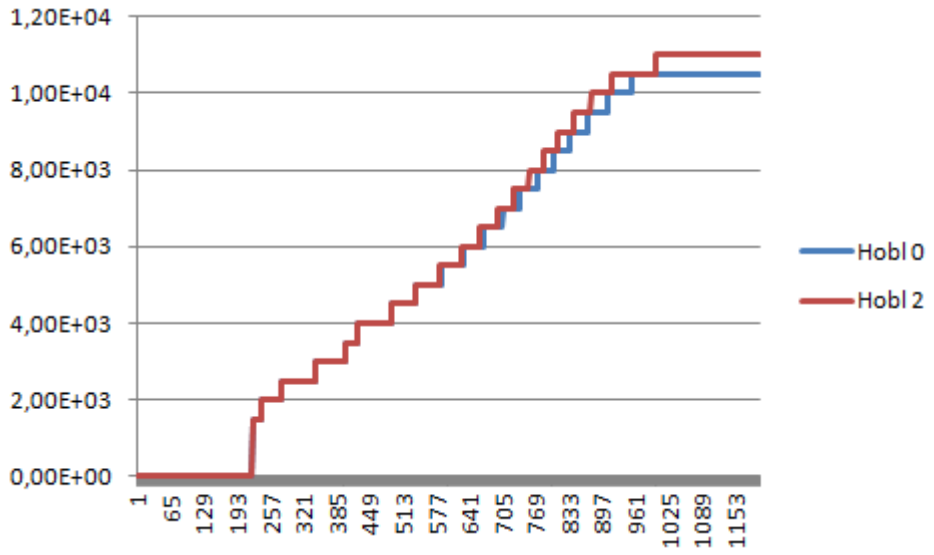


Рисунок 4.6 – Изменение со временем высоты облака при естественном развитии (0) и активном воздействии (2). По оси абсцисс отложены номера шагов по времени (шаг по времени dt=3 с), по оси ординат – высота в метрах. Имеет место увеличение высоты.

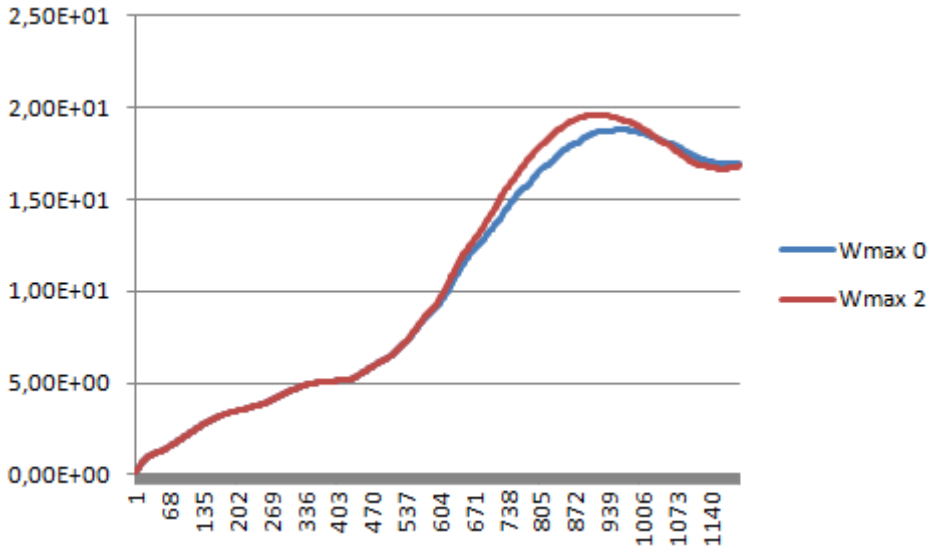


Рисунок 4.7 - Изменение со временем максимальной скорости восходящих потоков при естественном развитии (0) и активном воздействии (2). По оси абсцисс отложены номера шагов по времени (шаг по времени dt=3 с), по оси ординат – скорость в м/с. Имеет место увеличение Wmax.

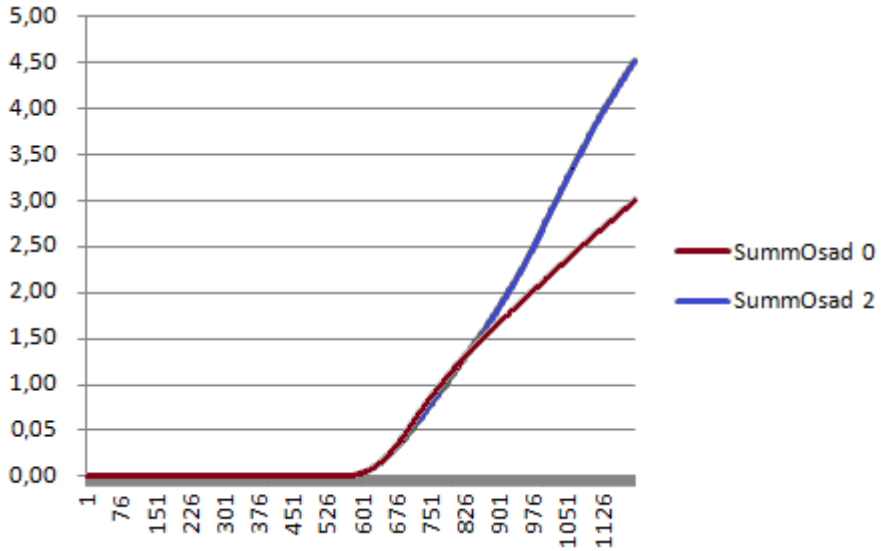


Рисунок 4.8 – Изменение со временем суммы осадков при естественном развитии (0) и активном воздействии (2). По оси абсцисс отложены номера шагов по времени (шаг по времени dt=3 с), по оси ординат – сумма осадков в мм.

На основе результатов проведенных расчетов получено, что в большинстве случаев воздействие необходимо проводить на температурном уровне –6 ^{0}C, на облака, находящиеся в стадии развития.

Дозировка реагента для облаков различной мощности в зависимости от средств воздействия и состояния атмосферы подбирается на основе расчетов по модели.

4.3 Планирование и организация работ по АВ на облака

Общее руководство работами по воздействиям на облака должно осуществляться из специально организуемого для этих целей наземного Оперативного центра.

Для нормальной работы по управлению активными воздействиями на облака в ОЦ обеспечивается поступление следующих видов информации:

1. Стандартной синоптической информации.

2. Данных радиозондирования атмосферы.

3. Данных наземного метеорологического радиолокационного комплекса.

4. Данных бортовой самолетной аппаратуры об измерениях характеристик атмосферы и облаков.

5. Данных наземной осадкомерной сети.

6. Спутниковой метеорологической информацией об облачности.

Большое значение для повышения эффективности активных воздействий на облачные системы имеет информация метеорологического радиолокатора, существенно расширяющая возможности оперативного получения детальных данных о характеристиках полей облаков и осадков на площади работ. Информация с метеорологического радиолокатора отображается на мониторе персонального компьютера в виде карт площадью до 400 км^2. При этом радиолокационные данные могут интерпретироваться как:

- горизонтальное сечение радиолокационной отражаемости облачности на некоторой выбранной высоте;
- карта интенсивности осадков;
- карта высот верхней границы облачности;
- карта явлений погоды;
- карта суммы осадков за интервал времени.

По радиолокационным данным из оперативного центра может осуществляться точное наведение самолетов, участвующих в воздействиях, на объекты воздействий.

Последовательность мероприятий, выполняемых в процессе подготовки и проведения оперативных работ по воздействиям такова:

1. Прогноз условий для воздействий составляется синоптиком Оперативного центра и включает в себя прогноз синоптического положения (перемещения и эволюция барических образований, фронтов, облачных систем) и прогноз развития облаков, пригодных для воздействий. Прогноз составляется на 36 ч с делением на 12-часовые интервалы.

2. Наличие в прогнозе информации о пригодности облаков для воздействия служит основанием для организации вылетов по заявкам текущего дня и для подачи заявок на вылеты на следующий день. Количество и сроки вылетов определяются ожидаемой продолжительностью пребывания над районом работ облаков, пригодных для воздействия.

3. Решение о проведении работ принимается руководителем воздействий на основании:

- прогноза погоды,
- данных метеорологического радиолокатора,
- данных моделирования эволюции облаков при естественном развитии и активном воздействии (моделирование параметров облаков выполняется по данным зондирования атмосферы).

Оперативный центр укомплектовывается средствами оргтехники, необходимыми для анализа, отображения и документирования метеорологической информации и контроля принимаемых решений.

Полеты самолетов-метеолабораторий с целью исследования термодинамических процессов атмосферы и активных воздействий на облака выполняются в строгом соответствии с инструкциями, согласованными и утвержденными региональными Управлениями гражданской авиации и подразделениями ВВС МО.

4.4 Критерии выбора объектов воздействия

Пока еще отсутствуют научно обоснованные и статистически подтвержденные критерии пригодности различных типов облачности, основанной на доступной в повседневной практике метеорологической информации. Не разработаны объективные методы надежной количественной оценки эффективности в единичных опытах.

При оценке пригодности облаков для воздействия предлагается использовать два подхода. Первый подход основан на обобщении

практического опыта по активным воздействиям на облака, второй – на моделирования эволюции облаков при естественном развитии и активном воздействии.

Остановимся на первом подходе. Опыт активных воздействий на облака с целью искусственного увеличения осадков из облаков летнего периода для нужд сельского хозяйства показывает, что наиболее благоприятные метеорологические условия для проведения массовых засевов облаков наблюдаются при синоптических ситуациях, когда вблизи фронтальных разделов происходит формирование полей мощно-кучевых облаков [88]. Критерии выбора объектов воздействия сводятся при этом к выполнению следующих требований:

- вершины конвективных облаков должны располагаться на высотах 4000-6000 м;
- температура воздуха на уровне вершин должна быть -10 ÷ -25 ^{o}C.
- облака должны находиться в стадии развития;
- вертикальная мощность переохлажденной части облака составляет не менее 1000 м;
- горизонтальная протяженность облака составляет не менее 2000 м.

В районе проведения работ засеваются отдельные облака, облачные скопления и гряды, характеристики которых соответствуют приведенным критериям [88].

Более перспективными объектами для воздействий с целью получения дополнительных осадков являются мезомасштабные облачные образования, представляющие собой системы объединенных или близко расположенных друг от друга облачных ячеек.

В качестве критериев пригодности слоистообразных облаков принимается следующее сочетание их характеристик и параметров:

- наличие переохлажденной части, содержащей капли;
- минимальная температура в облачном слое составляет –4 ^{o}C или ниже;

- вертикальная мощность облачного слоя составляет не менее 300 м;
- высота нижней границы облаков над поверхностью земли составляет не более 1000-1500 м.

При прочих равных условиях эффект воздействий с целью увеличения осадков тем больше, чем больше влагозапас облаков (водность и вертикальная мощность), а также чем больше степень переохлаждения жидкой фазы [88].

Согласно второго подхода, характеристики потенциальных объектов воздействия определяются на основе результатов численного моделирования с использованием данных зондирования атмосферы и термодинамических параметров на нижней границе облака. При этом хорошо отработанная модель количественно оценивает на какие облака (с какими характеристиками) целесообразно воздействовать, на какие – нет. Таким образом, критерии выбора объектов воздействия могут быть конкретными, рассчитанными на данное термодинамическое состояние атмосферы.

Определение количества дополнительных осадков на опытной территории, над которой проводился засев облаков, является одним из ключевых моментов работ по ИУО.

Количество дополнительных осадков в результате АВ определяется следующим выражением:

$$\Delta Q = Q_{возд} - Q_{ест} , \qquad (4.2)$$

где $Q_{возд}$ – количество осадков, выпавших из облаков подвергшихся воздействию; $Q_{ест}$ - такое их количество, которое бы выпало при естественном развитии этих облаков.

Первое слагаемое измеряют с помощью осадкомерной сети или проградуированным метеорологическим радиолокатором.

Второе слагаемое определяют двумя способами:

При рандомизированном засеве $Q_{ест}$ получают на основе прямых измерений с помощью осадкомерной сети или проградуированным метеорологическим радиолокатором.

Если нет рандомизации, то $Q_{ест}$ прогнозируется по уравнению регрессии с осадками контрольной территории:

$$Q_{ест} = a^* Q_{кт} + b , \quad (4.3)$$

где $Q_{кт}$ – осадки на контрольной территории; a и b – коэффициенты линейного уравнения регрессии, определяемые методом наименьших квадратов с использованием многолетних архивных данных об осадках на опытной и контрольной территории за период, предшествовавший воздействиям.

С помощью численной модели облака эффект воздействия оценивается следующим образом.

Рассчитываются параметры облака при естественном развитии и вычисляется $Q_{ест}$. Рассчитываются параметры облака при активном воздействии, что позволяет получить значение $Q_{возд}$. На основе выражения (4.2) определяется количество дополнительных осадков ΔQ.

Второй подход реализуется при наличии в центре управления работами по ИУО отработанной математической модели и специалиста по численному моделированию облаков.

Данные аэрологического зондирования позволяют рассчитать по модели характеристики облаков для принятия решения о воздействии в мезорайоне.

4.5 Предложения по технологии АВ на переохлажденные облака по результатам численного моделирования

На основе анализа результатов моделирования засева облаков кристаллизующим реагентом разработаны рекомендации по усовершенствованию методики активного воздействия на конвективные облака.

Рекомендации по выбору объектов воздействия. Эффективность засева предварительно определяется по результатам моделирования на основе данных зондирования атмосферы, термодинамических параметров на нижней

границе облаков и их геометрических характеристик. При этом модель показывает - целесообразно ли проводить воздействие. Метод выбора объектов воздействия с применением моделей учитывает термодинамическое состояние атмосферы. Определяются геометрические и радиолокационные параметры объектов АВ, для которых эффективность имеет практическое значение (>10%).

Рекомендации по технологии засева. Активные воздействия на конвективные облака с целью ИУО необходимо проводить на температурном уровне –6 ^{o}C. Схема засева конвективных облаков состоит в следующем. В момент пересечения самолетом облака или прохода возле него с борта самолета производится отстрел пиропатронов. Хладореагенты сбрасываются при пролете через облака или по их верхней кромке. Осуществляется последовательный засев тех облаков над рабочей территорией, которые по своим характеристикам удовлетворяют расчетным критериям пригодности к засеву с целью получения дополнительных осадков.

Рекомендации по дозировке реагента. Дозировка реагента для облаков различной мощности в зависимости от средств воздействия представлена в таблице 4.9. Нормы расхода реагента разработаны с учетов результатов моделирования засева облаков, представленных выше.

Таблица 4.9 – Расход реагентов по результатам численного моделирования.

Мощность облаков, м	Средство воздействия		
	ПВ-26, шт/км	Твердая углекислота кг/км	Жидкий азот кг/км
1000-2000	1-2	0,5-1,0	0,1-0,2
2000-3000	2-3	1,5-2,0	0,3-0,4
3000-4000	3-4	2,5-3,0	0,5-0,6
4000-5000	4-5	3,5-5,0	0,7-0,8
>5000	5-8	5,0-7,0	0,8-1,0

4.6 Результаты моделирования активного воздействия на градовые облака

Одной из наиболее сложных в физике облаков является градовая проблема. Этой проблеме посвящено множество теоретических и экспериментальных исследований у нас в стране и за рубежом, в ходе которых установлены закономерности образования и развития градовых облаков различных типов, изучено их строение, разработаны методы воздействия на них [2,25,27,59,265]. Тем не менее, до сих пор многие вопросы, связанные с образованием и ростом градин, остаются нерешенными. В частности, все еще остаются малоизученными некоторые важные аспекты микрофизических процессов в градовых облаках из-за сложности теоретического анализа и экспериментального исследования. Недостаточно изучено в них взаимодействие термодинамических и микрофизических процессов. В то же время проблемы усовершенствования существующих и разработки научно-обоснованных методов активного воздействия на градовые облака требуют глубокого изучения этих вопросов.

Представляет практический интерес численное исследование эффективности воздействия кристаллизующим реагентом на градовые облака. Эта проблема рассматривалась во многих работах [19,23,27,51,67,177,192]. Недостатком многих исследований является использование моделей с параметризованной микрофизикой, в которых сложно корректно формализовать активное воздействие. В частности, невозможно корректно описать рост искусственных кристалликов и их взаимодействие с облачной средой из-за ограниченности числа классов размеров частиц (5-15), а значит и их физических свойств (скорость падения, коэффициент коагуляции и т.д.).

Функция $u(x, y, z, m, t)$ в системе уравнений модели облака (2.1)-(2.35) описывает источник искусственных кристаллов, а ее вид зависит от того,

какими средствами осуществляется воздействие. В данной работе моделировался монодисперсный источник:

$$u(x, y, z, m, t) = \gamma(t) \cdot \delta(m - m_{ист}) \cdot \delta(x - x_{ист}) \cdot \delta(y - y_{ист}) \cdot \delta(z - z_{ист}) \qquad (4.4)$$

где $\gamma(t)$ — функция, описывающая интенсивность источника искусственных кристаллов; $m_{ист}$ — масса искусственного кристалла; $x_{ист}, y_{ист}, z_{ист}$— координаты источника в облаке; δ —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:

$$F[u] = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} \int_{m_k}^{\infty} \int_0^{T} f_2(x,y,z,m,t)\, dx\, dy\, dz\, dm\, dt, \qquad (4.5)$$

где m_k — масса градины, способной достичь поверхности земли и нанести ущерб [32].

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

В каждой серии численных экспериментов предварительно проводился расчет формирования микроструктуры облака при естественном развитии (функция $u(x, y, z, m, t) = 0$). Было получено значение числа крупных градовых частиц, соответствующее естественному развитию облака. Затем проводились расчеты по перебору пространственного положения источника и его мощности.

Моделирование эволюции ансамбля облачных частиц с помощью разработанной модели проводилось в трехмерной прямоугольной области, выделенной в тропосфере. В области рассчитываются поля

термодинамических параметров, таких как: давление, температура, влажность, а также характеристики воздушных потоков и другие параметры облака.

При задании полей термодинамических параметров атмосферы в начальный момент времени использовались как одномерные (горизонтально однородные) данные аэрологического зондирования, так и трехмерные данные из GFS модели, как было отмечено в главе 2.

Максимальные значения скорости восходящих потоков на стадии появления первого радиоэхо (-10 dBZ) достигают 20 м/с на уровне 4,5÷5 км. Картина воздушных потоков представлена на рисунке 4.9 изолиниями вертикальных скоростей W(x,y,z). При анализе полей термодинамических характеристик облака отмечалась их деформация под влиянием вертикальных потоков воздуха. Поле температуры, как и поле скоростей потоков воздуха изменяется со временем в облаке.

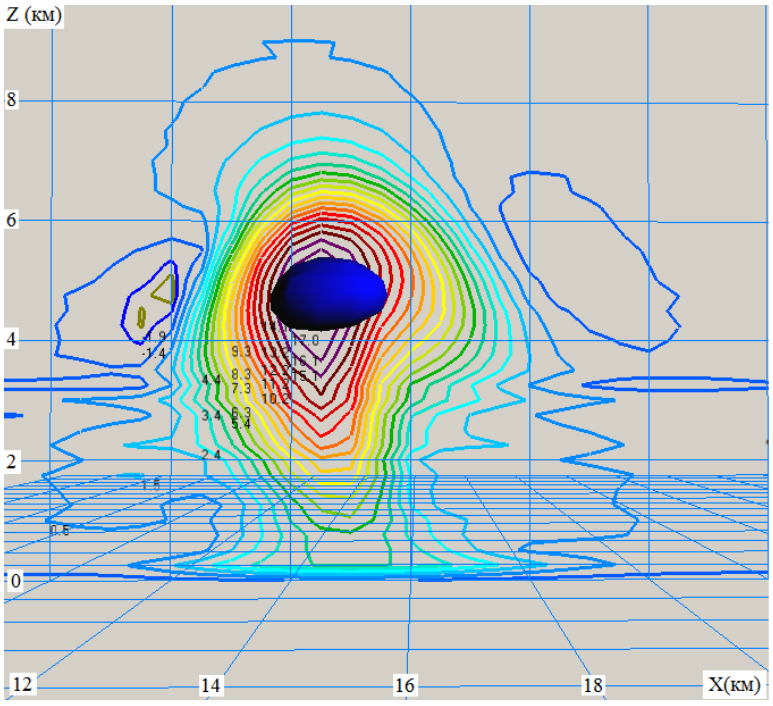
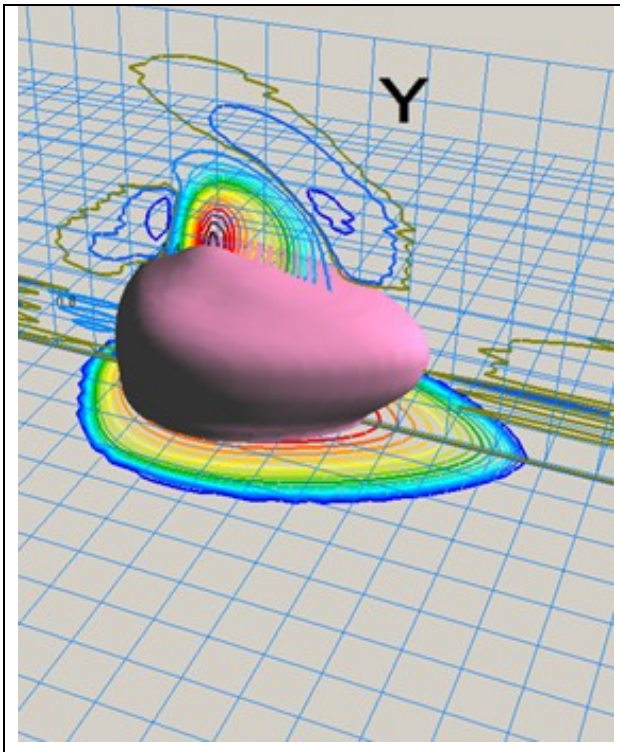


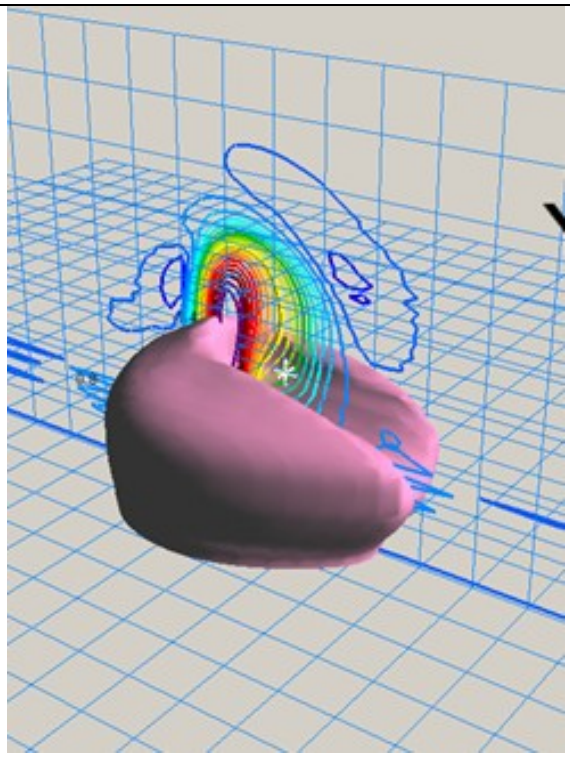
Рисунок 4.9 - Вертикальный разрез мощного конвективного облака. Изоповерхность водности (7 г/м^3) и изолинии вертикальных потоков воздуха (W) на 30-й минуте развития

В серии расчетов активное воздействие на градовое облако моделировалось включением точечного источника искусственных кристаллов с постоянной интенсивностью равной 10^6 $м^{-3}с^{-1}$ частиц, действующего в течение 1 минуты, начиная с момента времени t=24 мин. Искусственные частицы, выросшие в результате активации частиц реагента, считаются примерно одинаковыми, и относятся к первому классу сетки размеров, примененной в модели. Размер искусственных частиц составлял 2 мкм. По результатам расчетов определено, что воздействие более эффективно в области повышенной водности на температурном уровне -10 ^oC.

Вертикальные разрезы облака по данным зондирования за 07.06.2012 без воздействия (а) и с воздействием (б) приведены на рисунке 4.10.



а)



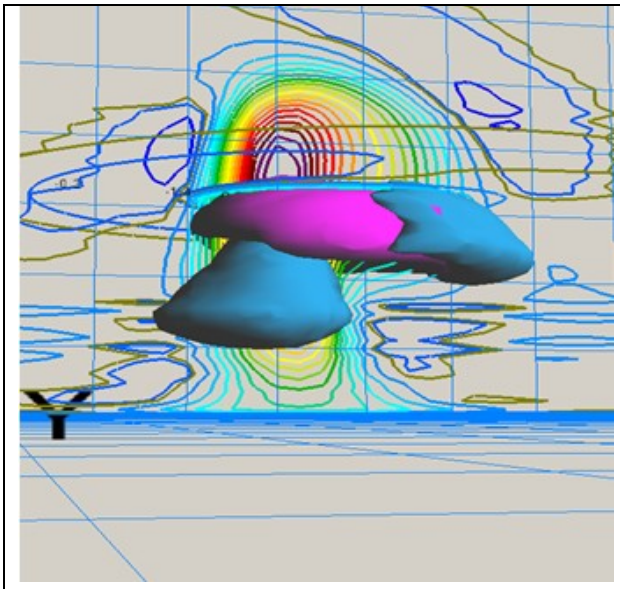
б)

Рисунок 4.10 - Облако на 30-й минуте без воздействия (а) и с воздействием (б). В области воздействия наблюдается уменьшение радиолокационной отражаемости (рис. б) за счет появления большого числа кристаллов, которые имеют меньшую эффективность обратного отражения.

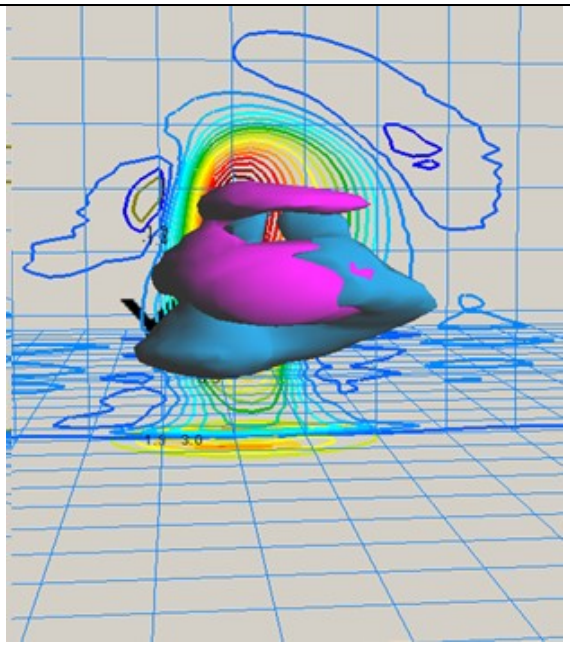
На рисунке 4.11 приведены в двух ракурсах результаты другого случая моделирования активного воздействия на градовое облако льдообразующим реагентом (воздействие моделировалось на 25 минуте развития).

В области воздействия в представленных случаях отмечается уменьшение радиолокационной отражаемости за счет появления множества кристаллов, из-за вызванной воздействием искусственной кристаллизации переохлажденных капель. На рисунках 4.11 (а,б) приведено одно и то же облако с разных ракурсов при естественном развитии (вид сбоку и вид сверху под небольшим углом). На рисунках 4.11 (в,г) приведено это же облако, но уже при воздействии на него кристаллизующим реагентом. Видно, что в области воздействия радиолокационная отражаемость уменьшается, образуется «провал».

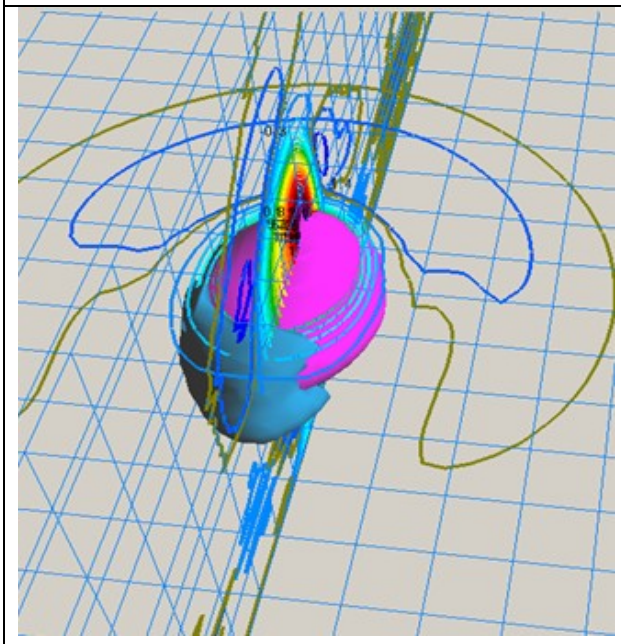
Остановимся на некоторых результатах исследования формирования микроструктуры градовых облаков, а также движения и роста градовых частиц в них, полученных на основе моделей. Как показали результаты расчетов, взаимодействие процессов различных типов в этих облаках играет важную роль в формировании микроструктуры облаков, в частности, в образовании и росте градовых частиц [27]. Вследствие деформации полей термодинамических параметров под влиянием динамических процессов в мощных конвективных облаках формируется зона, в которой происходит образование и рост градовых частиц [19-22,27]. Эта зона располагается между изотермами -10.÷.-30 ^{o}C и в области интенсивных восходящих потоков. С применением разработанной трехмерной модели в данной работе получено, что образование первичных градовых частиц происходит в верхней части этой зоны. В дальнейшем под влиянием горизонтальной составляющей вектора скорости воздушных потоков и силы тяжести происходит смещение градин от места образования и вниз. При этом увеличиваются размеры градин за счет захвата поступающих снизу в эту зону переохлажденных капель, также происходит увеличение их концентрации за счет образования новых градин в нижних частях этой зоны.



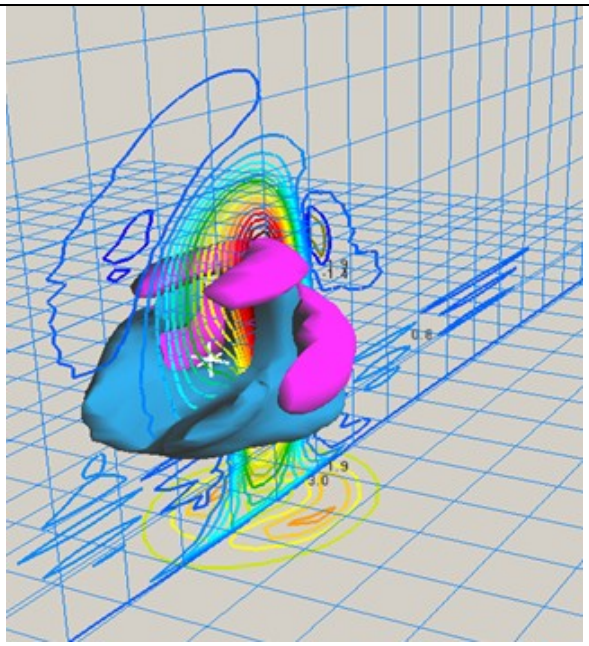
а)



в)



б)



г)

Рисунок 4.11 - Облако на 30-й минуте после воздействия. Варианты а), б) соответствуют естественному развитию облака в двух ракурсах. Варианты в), г) – облаку после воздействия, вид с двух ракурсов.

Важно отметить, что следствием деформации полей термодинамических характеристик облака под влиянием восходящих потоков, является увеличение времени нахождения градин (или их пути) в области, в которой термодинамические и микрофизические условия благоприятны для их роста.

Нами исследованы физические процессы, приводящие к достижению эффекта при воздействии. В частности, искусственные кристаллы активизируют процесс замерзания переохлажденной капельной фракции, за счет которой растут градины. Появление большого количества мелких кристаллов приводит к нарушению равновесного состояния между жидкокапельной и кристаллической фазами, начинается сублимационный рост кристаллов за счет перегонки пара с капель. В свою очередь, процесс испарения капель приводит к интенсификации их кристаллизации, кроме этого в результате увеличения размеров кристаллов происходит интенсивный захват ими переохлажденных капель.

Таким образом, внесение частиц льдообразующего реагента по предложенному способу приводит к замораживанию воды в зоне роста градовых частиц, т.е. к ухудшению условий роста градовых частиц. При этом не требуется чрезмерных затрат реагента, так как «работает» неустойчивость системы переохлажденные капли – кристаллы. Наиболее эффективным с точки зрения использования реагента и уменьшения градоопасности облака при проведении противоградовых работ является их внесение в ограниченную область, наиболее чувствительную к воздействию.

Очевидно, что эффективное решение проблемы активных воздействий на градовые облака невозможно без глубоких исследований закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков на основе полных физико-математических моделей, учитывающих взаимодействие процессов различных видов [19-31].

4.7 Исследования распространения реагента в облаках при активном воздействии

В данном разделе приведены результаты моделирования переноса и распространения частиц реагента в конвективном облаке, полученные с использованием трехмерной модели.

Моделировался случай активного воздействия, в котором внесение реагента осуществляется на уровне -10 ^{o}C (z = 5км) во фронтальной части облака. С использованием данных о содержании AgI в современных противоградовых ракетах, была определена начальная концентрация искусственных частиц в шлейфе за ракетой.

Решение уравнений модели выполняется численными методами и требует аппроксимации задачи на пространственной сетке. Вследствие этого минимальная пространственная сеточная ячейка модели ограничена шагами по высоте и горизонтали. В силу дискретного представления задачи начальная концентрация в шлейфе за ракетой должна быть пересчитана на объем, соответствующий минимальной сеточной ячейке. Время расширения шлейфа до объема ячейки модели оценивалось при расчетах на более мелких сетках с шагами: 0,1; 1; и 10 м. Источник в начальный момент времени из-за разбиения расчетной области на ячейки имеет объем $V_{ист}$=dx*dy*dz ($м^3$).

Трансформация облачного объема, содержащего искусственные кристаллы, прослеживалась в последовательные моменты времени 1, 3, 5, 10 минут и более.

Некоторые результаты расчетов представлены на рисунке 4.12, на котором изображен расширившийся вследствие турбулентной диффузии шлейф от противоградовой ракеты через 10 мин после воздействия. Представлены область формирования и роста градин (изоповерхность водности 5 г/$м^3$) – обозначена цифрой 1, и шлейф ракеты (изоповерхность концентрации искусственных частиц 10^3 1/$м^3$) – обозначена цифрой 2.

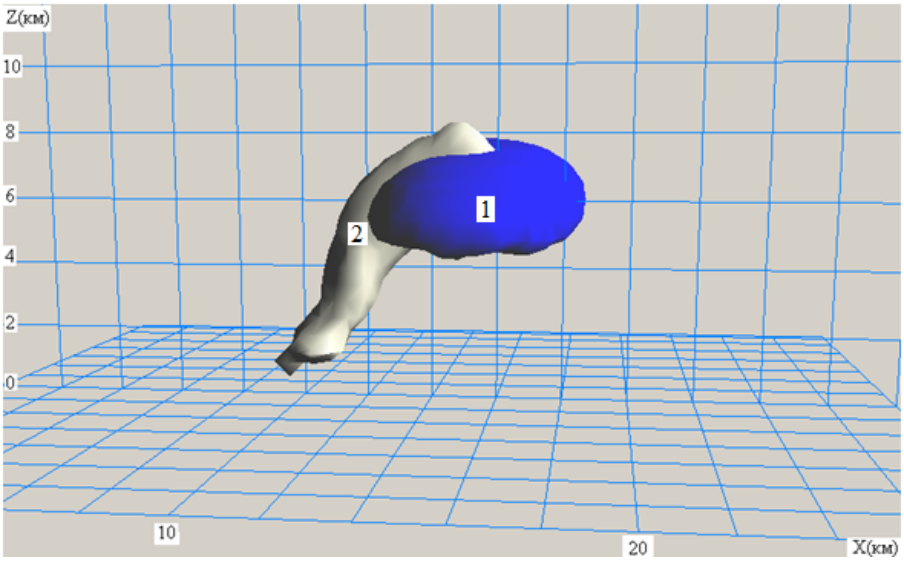


Рисунок 4.12 – Распространение кристаллизующего реагента при ракетном засеве через $\Delta T = 10$ мин. Среднее значение K в центре облака составляет 500 м^2/с.

В численных экспериментах варьировались: количество точечных источников и концентрация ледяных кристалликов в них, место и время внесения реагента. Искусственные частицы переносятся воздушными потоками, а расширение первоначально обработанной области происходит под влиянием турбулентной диффузии. Степень расширения засеянного объема определяется величиной коэффициента турбулентной диффузии.

Полученные данные показывают, что распространение искусственных частиц при значениях коэффициента турбулентной диффузии, которые наблюдаются на периферии облака, вне центральной части, идет медленнее. При этом реагент остается в ограниченном объеме по траектории полета противоградовой ракеты.

Выводы к главе

Применение численных моделей позволяет проанализировать влияние различных способов внесения реагентов в разные части облака на ход процессов осадкообразования.

В данной работе исследовано формирование осадков в конвективных облаках при естественном развитии и при воздействии кристаллизующим реагентом. С помощью развитой модели облака физический эффект воздействия оценивается путем сравнения параметров облака при естественном развитии с их значениями при активном воздействии.

На основе математического моделирования исследованы вопросы активного воздействия на конвективные облака с целью искусственного увеличения осадков. В численных экспериментах варьировались: концентрация искусственных кристаллов, координаты источника в облаке, момент воздействия. Проведен анализ эффективности внесения реагента при различных его концентрациях от 10^4 до 10^7 $м^{-3}$. Разработаны предложения по параметрам засева конвективных облаков с целью искусственного увеличения осадков.

По моделированию воздействия на градовые облака получено.

Определено влияние кристаллизующего реагента на микроструктурные параметры облака в результате засева. Определена область, воздействие в которую приводит к существенному эффекту по предотвращению образования крупных градин. Область внесения реагента по результатам расчетов должна быть расположена в центре облака, на температурном уровне -10.÷.-12 ^oC, в области умеренных восходящих потоков (5-10 м/с) и больших значений коэффициента турбулентной диффузии (>300 $м^2с^{-1}$).

Физика влияния искусственных ледяных частиц на микроструктуру облака заключается в том, что воздействие в наиболее водной части облака мелкими искусственными кристалликами в концентрации 10^6 $м^{-3}$ приводит к частичной или полной ликвидации там жидкокапельной фракции, в результате чего число крупных градин, образующихся в облаке, уменьшается.

На основе численных экспериментов исследовано распространение искусственных ледяных кристаллов в облаке с учетом фактических потоков, термодинамических условий, взаимодействия с облачной средой.

Глава 5

ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ И СИСТЕМ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИИ

В главе представлено разработанное программно-математическое обеспечение для приема, архивации, анализа и отображения радиолокационных, грозопеленгационных и спутниковых данных об облаках и осадках, сопряжения метеорологической информации. Программа обработки метеорологической информации «ГИМЕТ-2010» устанавливается на сети радиолокаторов ДМРЛ-С Российской Федерации. АРМ объединения радиолокационной и грозопеленгационной информации применяется на КДП военизированных служб по борьбе с градом и в центрах штормооповещения.

5.1 Программное обеспечение обработки данных доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С

Для наблюдения за фактической погодой в региональном масштабе служат метеорологические радиолокаторы, позволяющие обнаруживать облака и связанные с ними метеорологические явления в радиусе 250-300 км от места установки. Данные радиолокационных наблюдений одного МРЛ обеспечивают заблаговременность оповещения об опасных явлениях погоды за 1–3 ч, а сети МРЛ – за 6 - 12 ч.

В РФ разработан современный доплеровский метеорологический радиолокатор «ДМРЛ-С», который оснащается программным обеспечением приема, анализа и отображения информации «ГИМЕТ-2010» [58,126,142]. Актуальна задача построения единого радиолокационного поля нашей страны.

Радиолокационные данные наблюдений за конвективными облаками (особенно в режиме непрерывно следующих друг за другом обзоров) являются

крайне важными для проверки (валидации) разрабатываемых математических моделей облаков.

Современный доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С, предприятие изготовитель ОАО "НПО "ЛЭМЗ", г. Москва предназначен [54,58]:

- для отображения распределения различных метеорологических данных (отражаемости, скорости, ширины спектра, а также в режиме двойной поляризации: дифференциальной отражаемости, фазы, коэффициента кросскорреляции и линейного деполяризационного отношения) на различных высотных уровнях по типу псевдо-CAPPI;
- расчета и отображения вертикального профиля скорости, направления ветра до высоты верхней границы обнаружения метеообъектов и других доплеровских продуктов;
- расчета и отображения интенсивности осадков за любой интервал времени;
- определения опасных явлений погоды (град, гроза, шквальные усиления ветра, интенсивный дождь и снег, сильная турбулентность);
- отображения скорости и направления перемещения облачных систем;
- выдачи радиолокационной информации в информационную сеть в необходимых форматах, определенных ВМО или государственными структурами.

Существенным отличием радиолокатора ДМРЛ-С от существующих аналогов является применение технологии сжатия импульсов с уровнем боковых лепестков сжатия ниже 60 дБ, достигаемое за счет использования последних достижений цифровой техники [58]. Кроме того, применение сложных сигналов позволило сократить излучаемую мощность с сотен до десятков кВт.

По оценке специалистов, применение сложных сигналов открывает широкие возможности по созданию метеорадиолокаторов следующего

поколения. Использование в ДМРЛ-С режима двойной поляризации также значительно расширило его возможности за счет получения принципиально новой информации о структуре наблюдаемых метеообъектов. Данная информация стала доступной отечественным метеорологам в оперативном режиме наблюдений. ДМРЛ-С является в настоящее время одним из лучших радиолокаторов в мире.

Нами разработано программное обеспечение «ГИМЕТ-2010» вторичной обработки радиолокационной информации ДМРЛ-С, которое предназначено для приема, анализа, архивирования и отображения радиолокационной метеорологической информации [126,142].

Прикладное программное обеспечение применяется для обеспечения АМЦ аэропортов и автоматизированных систем управления воздушным движением информацией об облачности и связанных с ней опасных явлениях погоды (сильные ливни, грозы, град, шквал). ПО «ГИМЕТ-2010» обеспечивает решение следующих основных задач:

- получение и передачу потребителям оперативной радиолокационной информации о фактической погоде;
- диагностику развития облачности в работах по модификации погоды;
- обнаружение, распознавание и оповещение об опасных явлениях погоды для аэропортов и населенных пунктов;
- измерение интенсивности и количества выпавших осадков для сельского хозяйства, гидрологических прогнозов и мелиорации;
- получение карты осадков для сельского хозяйства и страховых компаний.

Вся информации, получаемая с помощью ПО «ГИМЕТ-2010», отображается по выбору оператора в виде следующих карт:

- карты горизонтальных сечений на любой высоте через 0,1 км (CAPPI) для всех получаемых продуктов (радиолокационной отражаемости,

радиальной доплеровской скорости; ширины спектра; дифференциальной отражаемости; дифференциальной фазы; коэффициента кросскорреляции);

- карты наклонных сечений (PPI);
- карты максимальной радиолокационной отражаемости;
- карты явлений погоды;
- карты вертикальных сечений облаков в любом направлении (RHI);
- карты интенсивности и количества осадков;
- карты вертикально интегрированной водности (VIL).

Любая из перечисленных карт может быть сохранена в файл, выведена на печать и передана по каналам связи потребителям.

Программное обеспечение рассчитано на операционные системы Linux и Windows.

Информация, получаемая с помощью программы вторичной обработки, отображается по выбору оператора в виде следующих карт:

- карты горизонтальных сечений на любой высоте через 0,1 км (CAPPI) для всех получаемых радиолокационных продуктов [32,197,199] (радиолокационной отражаемости, радиальной доплеровской скорости; ширины спектра; дифференциальной отражаемости; дифференциальной фазы; коэффициента кросскорреляции);
- карты наклонных сечений (PPI);
- карты максимальной радиолокационной отражаемости;
- карты явлений погоды;
- карты вертикальных сечений облаков в любом направлении (RHI);
- карты интенсивности и количества осадков;
- карты вертикально интегрированной водности (VIL).

Любая из перечисленных карт может быть сохранена в файл, выведена на печать и передана по каналам связи потребителям.

Комплекс программ «ГИМЕТ-2010» применяется на сети ДМРЛ-С Российской Федерации.

На рисунках 5.1- 5.4 приведены примеры карт, которые выдает программное обеспечение «ГИМЕТ-2010». Карта опасных явлений погоды представлена на рисунке 5.1. В левом вернем углу приведено окно вертикального разреза облачности. Обозначения метеорологических явлений цветовой палитрой приведены справа в нижней половине рисунка. На рисунке 5.2 приведена карта радиолокационной отражаемости облачности. На рисунке 5.3 приведена карта горизонтального ветра. Радиолокатор ДМРЛ-С является двухполяризационным, поэтому он выдает еще и поляризационные параметры, на рисунке 5.4 в качестве примера приведена карта дифференциальной отражаемости.

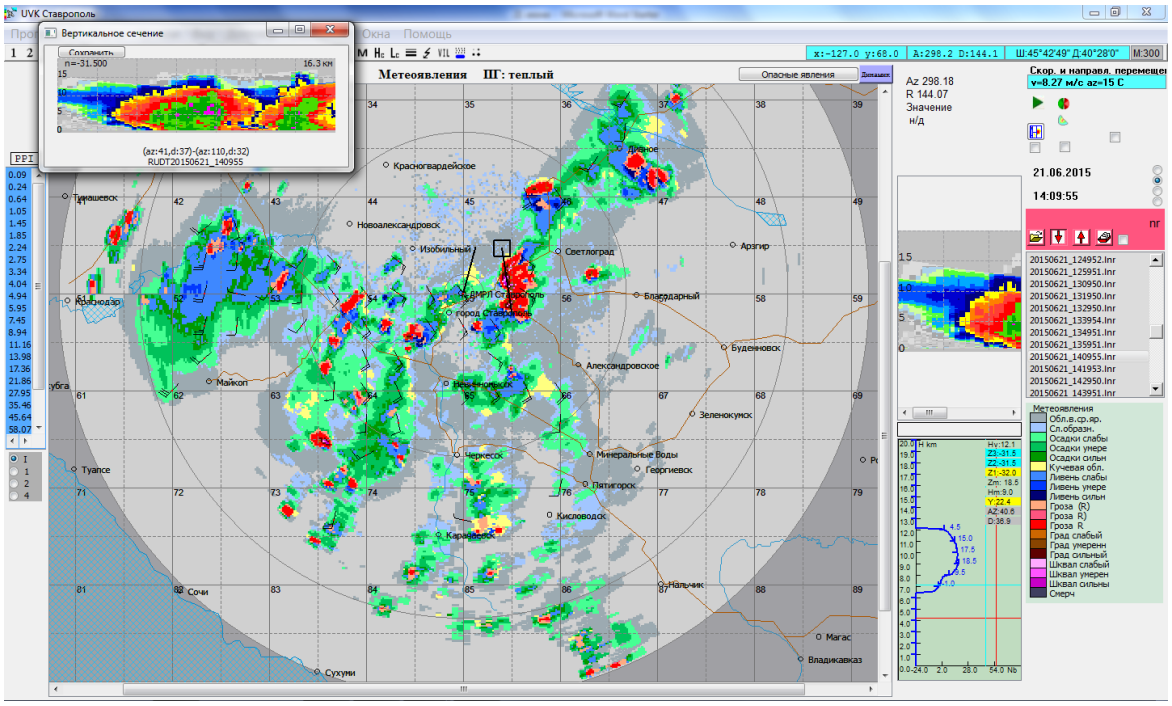


Рисунок 5.1 – Радиолокационная карта наблюдаемых явлений погоды на территории СКФО по доплеровскому радиолокатору ДМРЛ-С (г.Ставрополь).

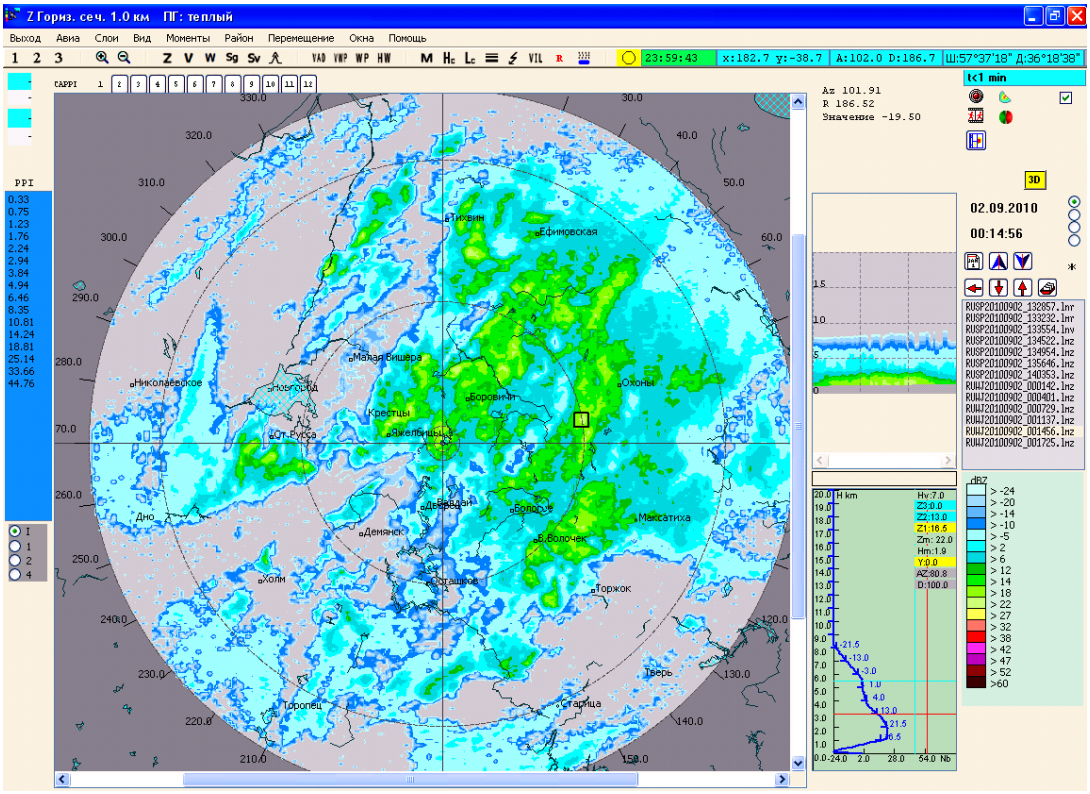


Рисунок 5.2 – Карта радиолокационной отражаемости.

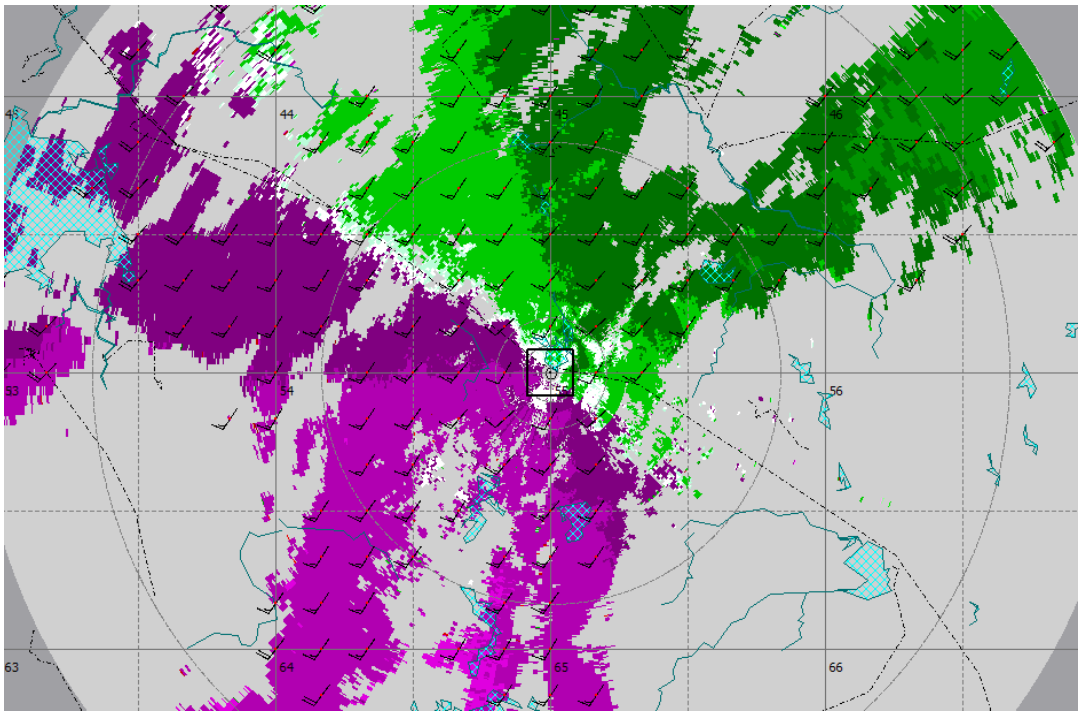


Рисунок 5.3 – Карта горизонтального ветра.

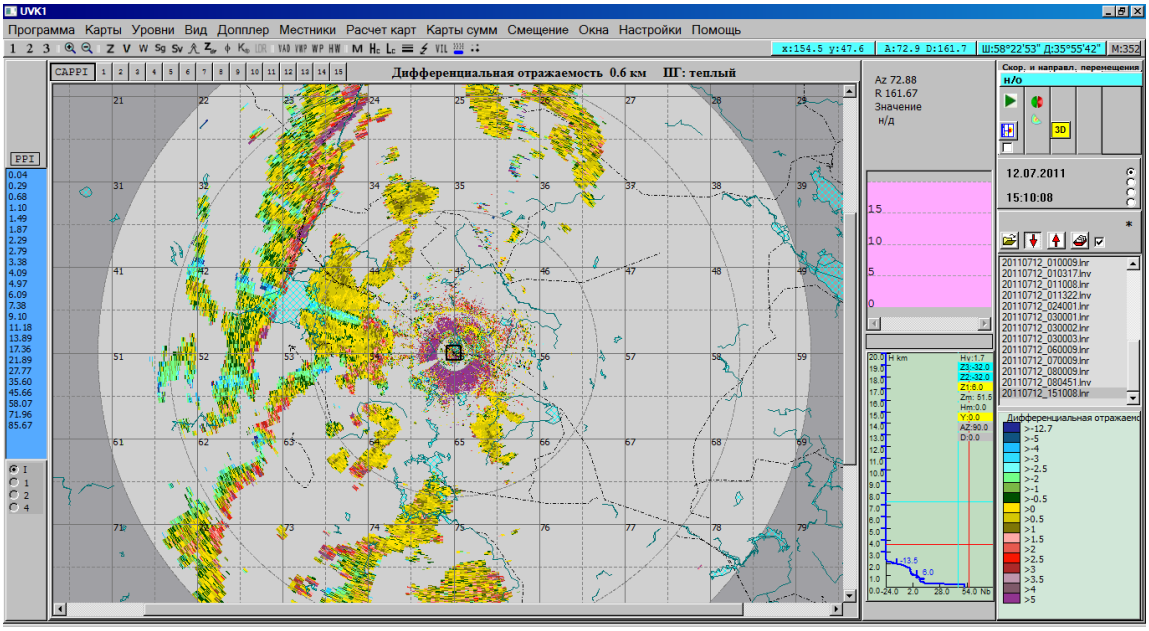


Рисунок 5.4 - Карта дифференциальной отражаемости.

Более подробно описание программного обеспечения "ГИМЕТ-2010", а также формулы и алгоритмы обработки радиолокационных данных приведены в Приложении Б.

5.2 Программное обеспечение комплексного анализа радиолокационной, грозопеленгационной и спутниковой информации

В настоящее время в радиометеорологии широко внедряются информационные системы, в задачи которых входит объединение результатов наблюдений нескольких МРЛ с пересекающимися областями обзора пространства [32]. Такое объединение информации нескольких МРЛ позволяет получать единую комплексную радиолокационную карту региона (или целой страны), информативность которой значительно выше, чем от отдельных радиолокаторов. Суммарные за интервал времени карты опасных явлений позволяют оценить полную площадь, подверженную воздействию гидрометеорологических процессов.

Для обнаружения и предупреждения об опасных быстроразвивающихся конвективных процессах на территории Южного и Северо-Кавказского

федеральных округов в Высокогорном геофизическом институте разработаны несколько АРМ приема, комплексного анализа и отображения радиолокационной, грозопеленгационной, спутниковой и наземной (автоматические метеостанции) метеорологической информации [3,7-12,86,120,124,126,127, 133,134,136,140,141,146-150,157-159,264].

Метеорологическая информация на АРМ поступает по каналам связи от радиолокаторов МРЛ-5, новых доплеровских радиолокаторов ДМРЛ-С, грозопеленгационной системы, автоматических метеостанций и других источников. Распознавание грозоградовых облаков осуществляется радиолокационными методами с учетом данных грозопеленгации. Алгоритмы текущего прогноза динамики метеоявлений основаны на аппрокцимации и экстраполяции данных, и на формализации полученных при численном моделировании конвективных процессов закономерностей.

Непосредственно автором диссертации разработано прикладное программное обеспечение, которое выполняет следующие функции:

- прием данных;

- отображение пространственной структуры полей облачности, осадков и гроз на фоне карты местности;

- отображение карт опасных явлений погоды (ливневые осадки, грозы) на фоне карты административных границ районов края;

- анализ эволюции облачных структур, направления и скорости перемещения облаков, облачных систем и опасных явлений погоды.

Примеры полученных на АРМ карт штормооповещения по ЮФО и СКФО представлены на рисунках 5.5 – 5.11. На рисунках 5.5-5.6 приведена сшивка радиолокационной информации с нескольких МРЛ за 10 минутный интервал времени. На рисунке 5.5 приведена сшивка в высоком разрешении (250м), которое обеспечивают современные радиолокаторы. На рисунке 5.6 приведена сшивка, полученная при использовании данных, передаваемых радиолокаторами в сеть Авиаметтелеком в коде BUFR [32].

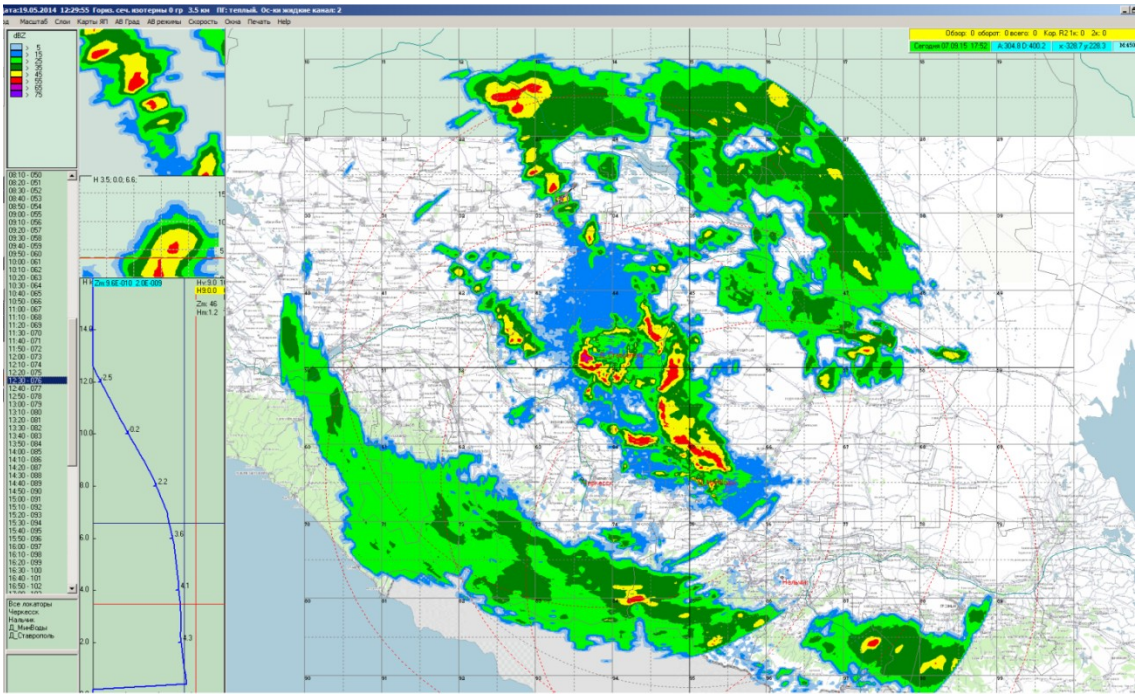


Рисунок 5.5 - Карта радиоэхо облачности по Северному Кавказу с нескольких МРЛ

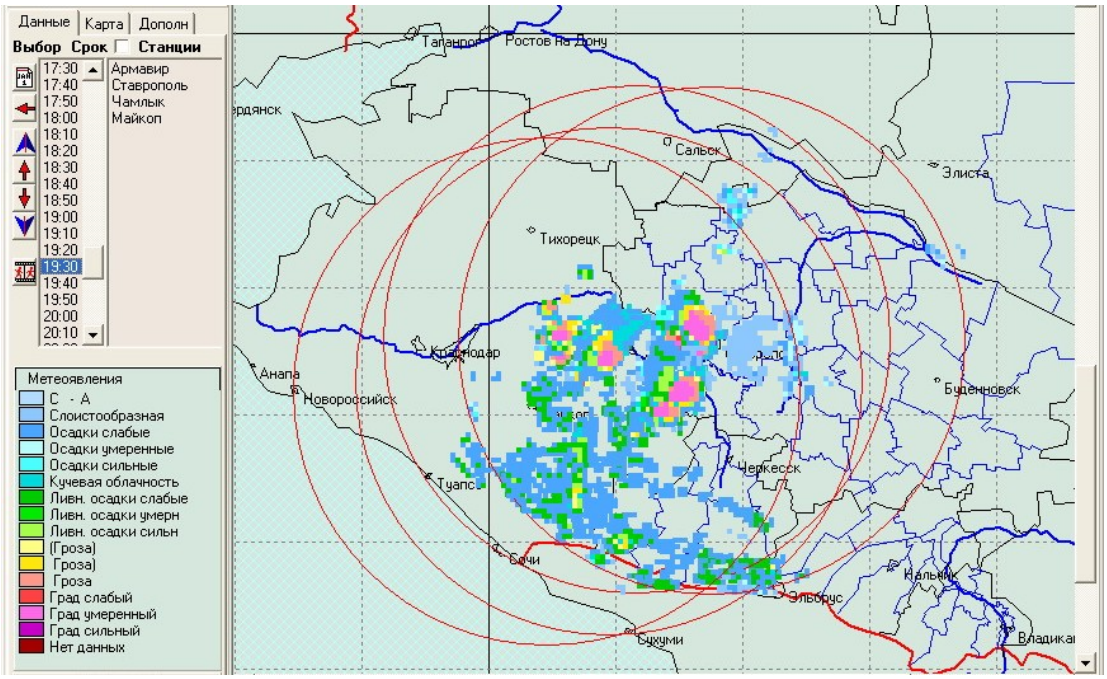


Рисунок 5.6 - Пример объединенной карты метеорологических явлений с сети ЮФО и СКФО в коде BUFR. Кругами выделены области охвата каждого из радиолокаторов.

Показаны опасные явления погоды, идентифицированные по радиолокационным данным нескольких МРЛ. Пространственное разрешение карт радиолокационных продуктов, передаваемых в коде BUFR для Авиаметтелеком принято 4х4 км [32].

На рисунке 5.7 представлена композитная карта радиолокационной отражаемости облачности и вертикальное сечение через наиболее интенсивную ее часть.

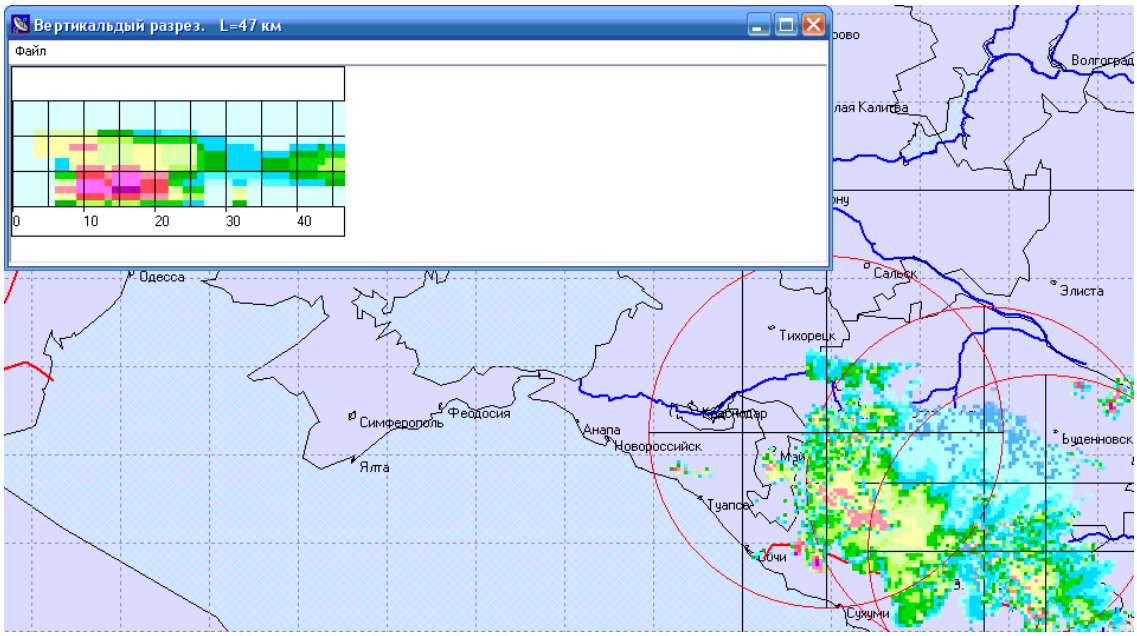


Рисунок 5.7 – Объединенная карта радиолокационной отражаемости и вертикальный разрез облачности.

На рисунке 5.8 приведено распределение грозовых разрядов на территории Северного Кавказа за 10 минутный интервал времени в мае месяце 2013 г по данным LS8000. Слева на рисунке 5.8 показана цветовая палитра - разбиение по интервалам количества разрядов в грозовых облаках за время наблюдения.

На рисунке 5.9 приведена карта разрядов за 1 час наблюдений.

Карта разрядов за сутки, зарегистрированных грозопеленгационной системой LS8000 (ФГБУ "ВГИ"), представлена на рисунке 5.10.

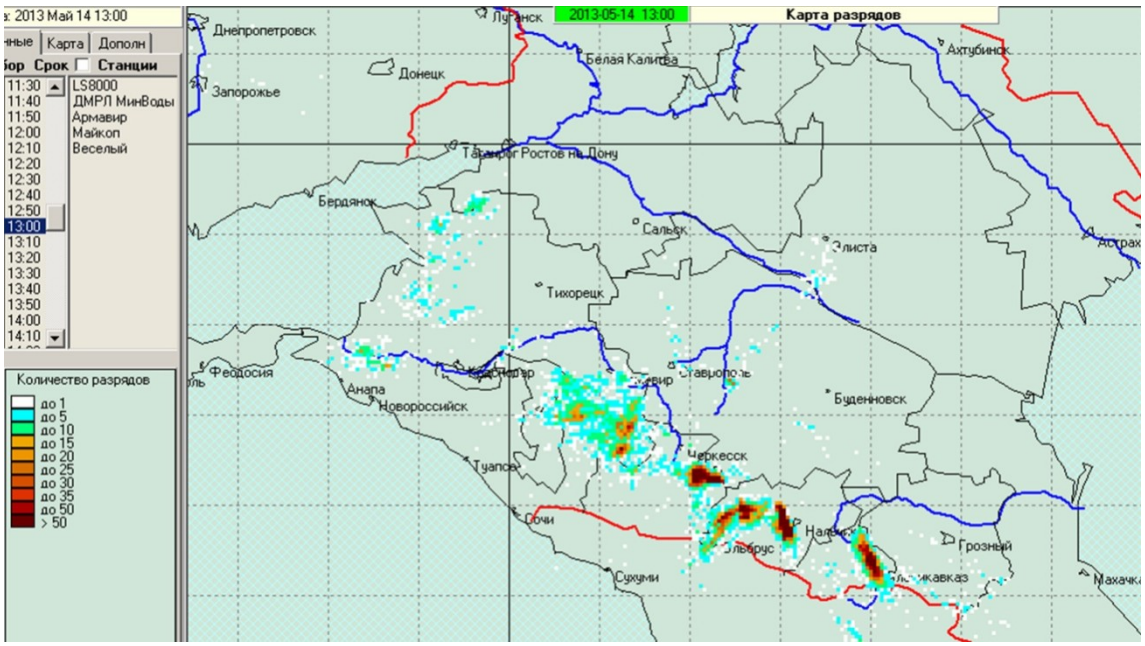


Рисунок 5.8 - Режим отображения грозовых разрядов (внутриоблачных и облако-земля) за интервал времени 10 мин на территории ЮФО и СКФО. Шкала градаций соответствует количеству разрядов на 1 км^2.

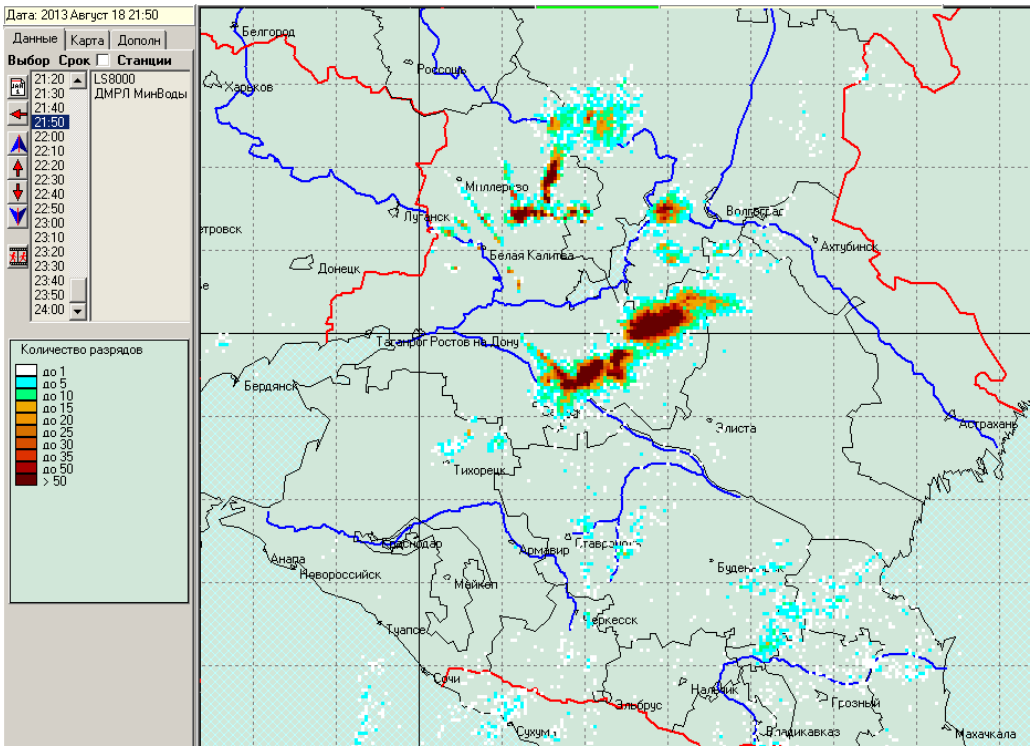


Рисунок 5.9 – Количество разрядов за 1 час наблюдений

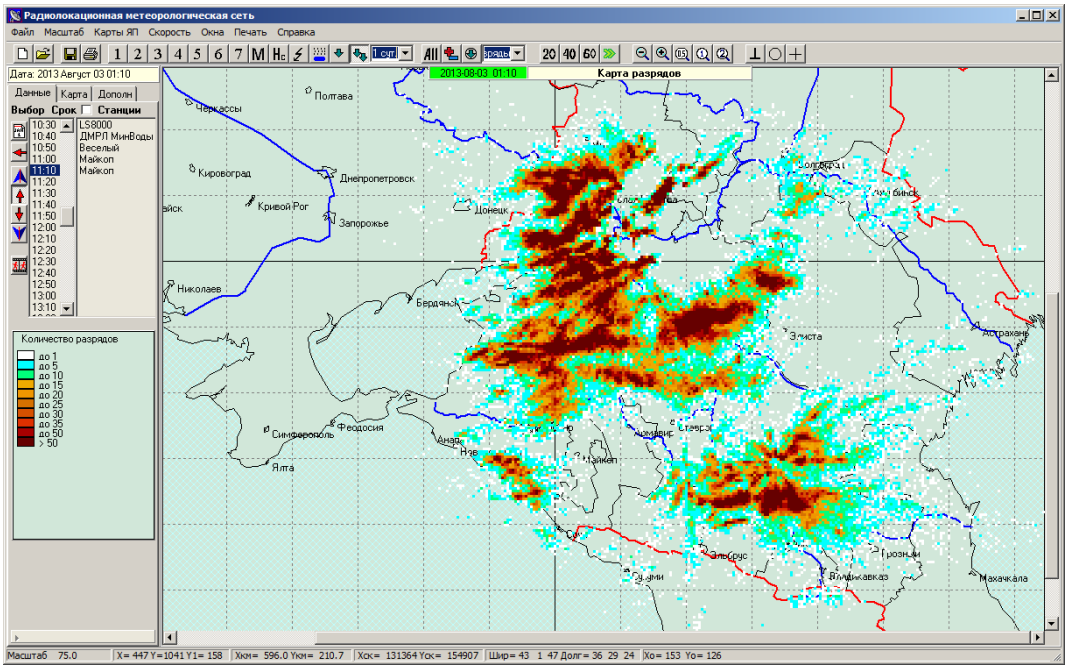


Рисунок 5.10 - Карта разрядов за сутки

Разработанное ПО позволяет выполнять совмещение радиолокационных, грозопеленгационных и спутниковых данных [136]. Примеры карт с объединенной информацией радиолокаторов и грозопеленгатора приведены на рисунках 5.11-5.13.

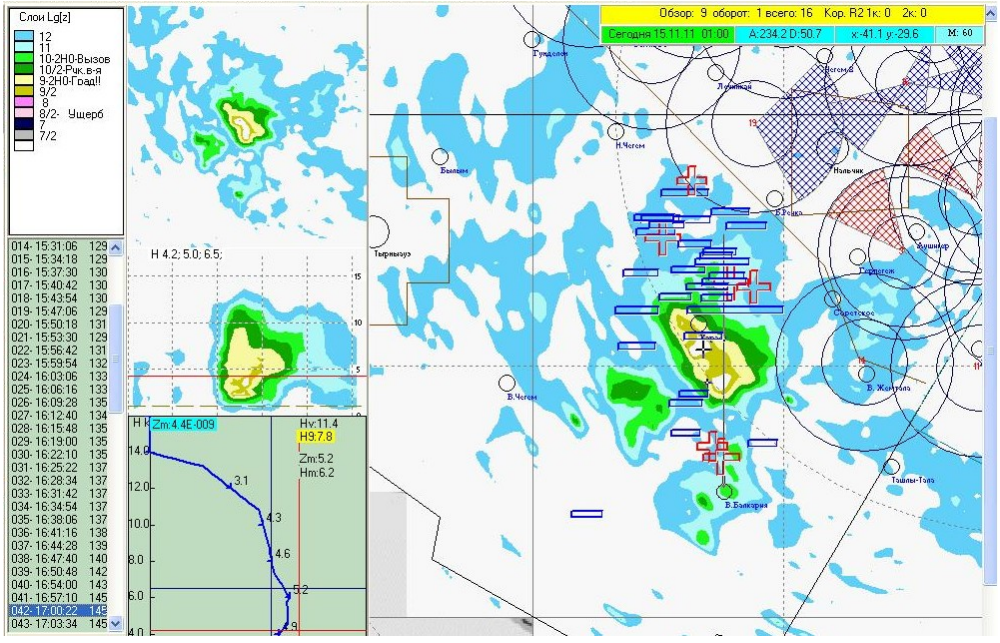


Рисунок 5.11 – Радиолокационные данные МРЛ-5, совмещенные с данными грозопеленгатора (разряды облако-земля)

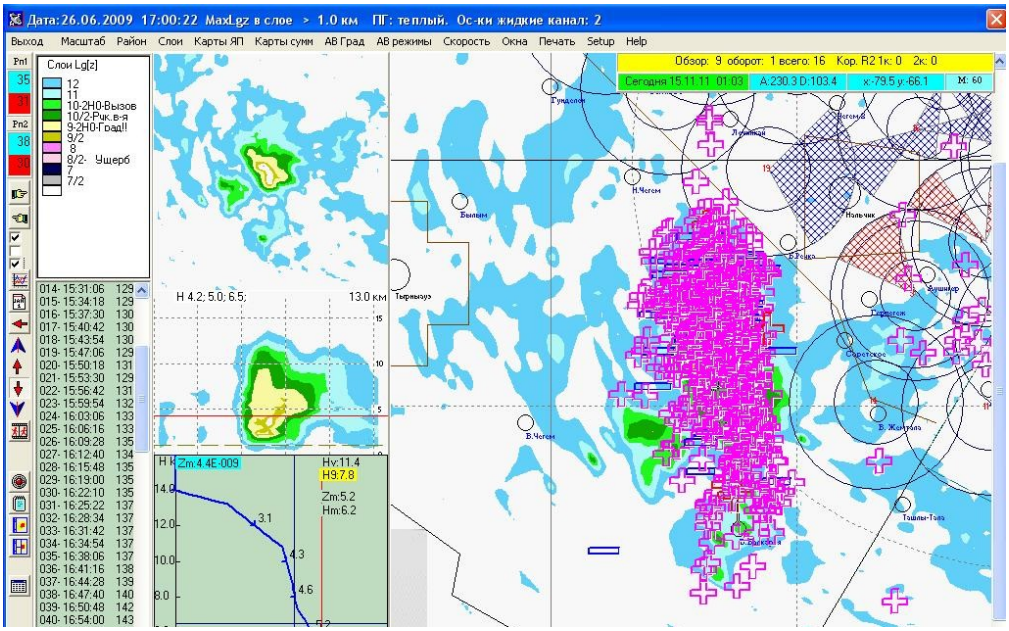


Рисунок 5.12 – Данные МРЛ-5, совмещенные с внутриоблачными разрядами, зарегистрированными системой LS8000.

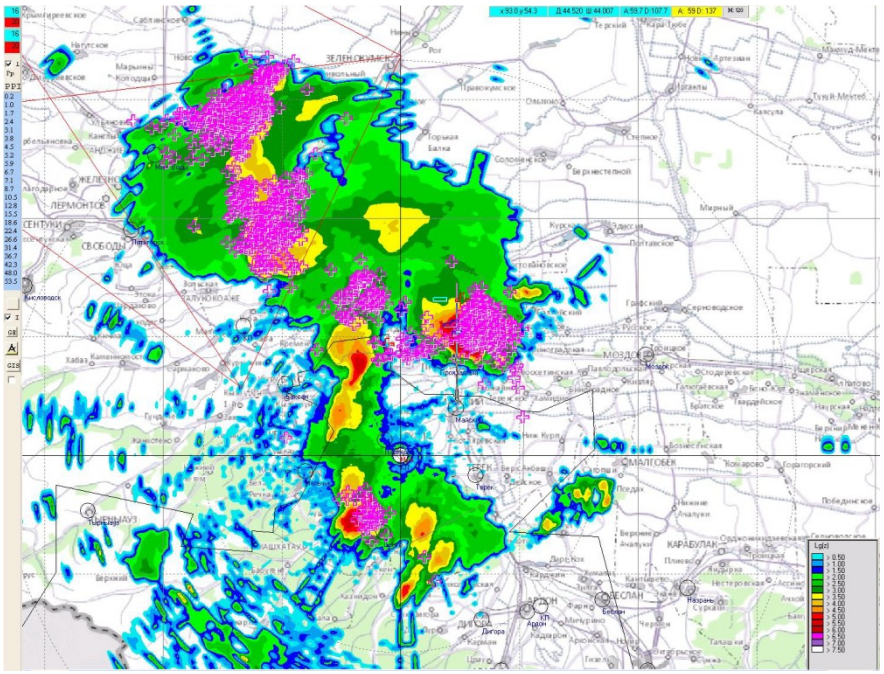


Рисунок 5.13 - Комплексная карта грозового процесса с внутриоблачными разрядами

Для контроля гроз и других опасных явлений погоды в программном обеспечении предусмотрено совмещение данных со спутниковой информацией, пример приведен на рисунке 5.14. Поддерживается возможность вывода интегральной информации о разрядах за процесс (рисунок 5.15).

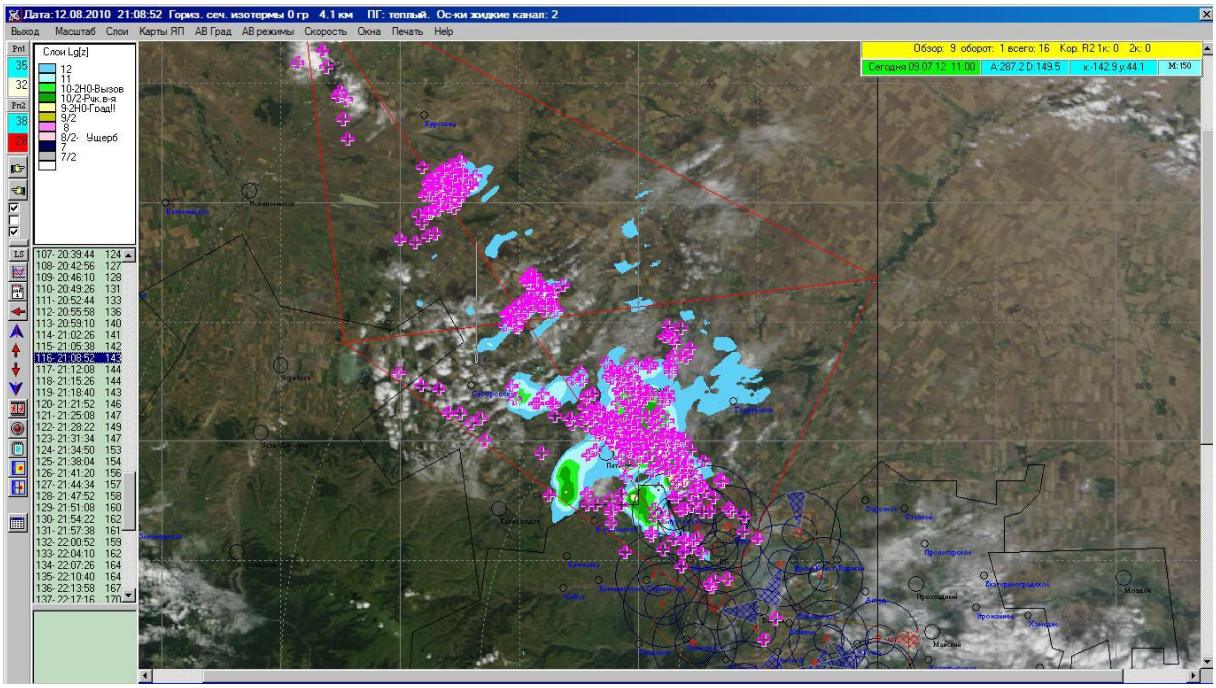


Рисунок 5.14 - Данные грозопеленгатора LS8000, совмещенные со спутниковой и радиолокационной картами

Разработанное ПО предназначено для формирования единых композитных карт явлений погоды в региональном масштабе.

АРМ объединения радиолокационной, грозопеленгационной и спутниковой информации позволяет повысить надежность предупреждений об опасных гидрометеорологических процессах за счет дублирующей или компенсирующей информации (при отсутствии данных в одном из каналов).

В ПО использованы алгоритмы и критерии распознавания опасных конвективных процессов из работы [109].

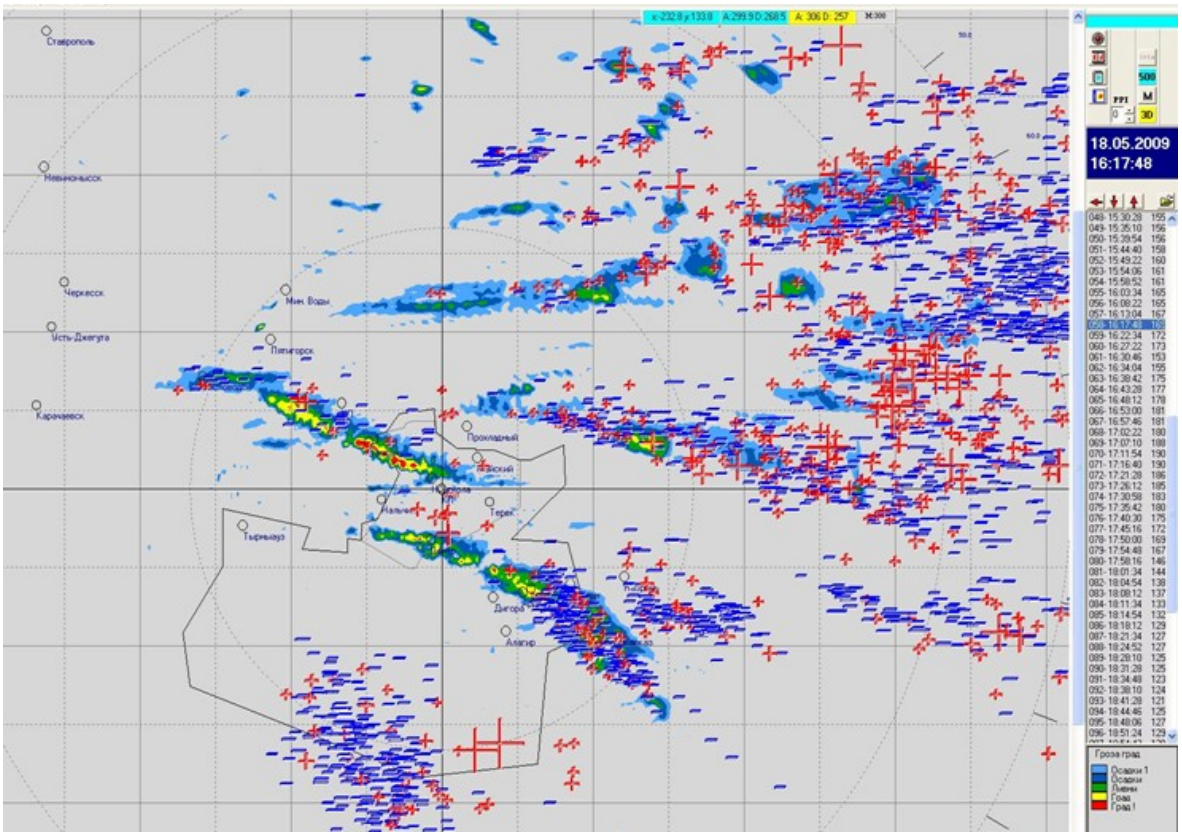


Рисунок 5.15 – Карта интенсивных осадков и грозовых разрядов за время прохождения процесса

В различные периоды года в зависимости от фазового состояния выпадающих осадков для анализа используются разные данные. Периоды года определяются по значениям температуры воздуха у земли и высоты нулевой изотермы H(0 °C). В радиолокационной метеорологии различают 3 периода: теплый, холодный, переходный [109]. Использование данных с учетом H(-22 °C) и H(0 °C) повышает вероятность правильного распознавания явлений погоды, облачности и осадков. Для классификации метеоявлений необходимо еще выбрать уровень выпадения осадков Z_1 (0,3-1 км) и поправку к расчету Z_3 (ΔH =2-2,5 км).

Явления классифицируются по группам [32]:

облачность, осадки, ливни, грозы, град, шквалы и смерчи.

Для каждого периода года критерии распознавания явлений погоды задаются отдельно.

Для идентификации облачности по периодам года используются следующие параметры: верхняя и нижняя граница облачности, минимальное значение отражаемости, значения отражаемости на уровнях Z_2 и Z_5 [109].

Осадки рассчитываются по критерию наличия отражаемости на уровнях Z_1 и Z_2 (в зависимости от региона критерии могут уточняться).

Ливни аналогично осадкам рассчитываются по критерию наличия отражаемости на уровнях Z_1 и Z_2 (в зависимости от региона критерии могут уточняться).

Одним из опасных явлений, порождаемых конвективными процессами, является гроза. Сопутствующими явлениями гроз являются шквалистый ветер, ливневые осадки, нередко с градом. Грозы потенциально несут в себе целый комплекс опасных погодных явлений, в том числе смерчи.

Для определения опасных явлений погоды используются критерии, изложенные в работе [109].

Радарные и грозопеленгационные данные обеспечивают распознавание явлений погоды и их отображение на фоне карты региона. Эти данные поступают на АРМ обработки с высоким временным разрешением, что важно для слежения за быстроразвивающимися процессами (ливни, грозы, град). Обновление информации в режиме шторма может осуществляться с интервалом 1 минута по грозопеленгатору и 3,5 минуты по МРЛ-5. Период обновления информации с радиолокаторов ДМРЛ-С равен 10 минутам[54].

Осадки измеряются радиолокационным методом [32,53,109]. Измерение суммы осадков за любой интересующий пользователя отрезок времени осуществляется путем интегрирования осадков в отдельных обзорах. Например, за 1 час, за 3 часа, за весь период дождя, за сутки, 10 дней, месяц, квартал и т.д. Отображение карт суммарного количества осадков в АРМ осуществляется в виде цветных карт, отображаемых на фоне карты местности.

Данные автоматических метеостанций станций обеспечивают сопоставление радиолокационной информации с фактической погодой в

отдельных точках региона и служат калибровочными данными для радарных измерений вида, интенсивности, и количества осадков.

5.3 Методика анализа динамики конвективных процессов

В данном разделе решается задача текущего прогноза мезомасштабной метеорологической обстановки по радиолокационным и грозопеленгационным данным [189,223].

Для определения параметров движения облачности с целью предсказания их положения необходимо выделить и проанализировать объекты облачности. Эффективными средствами в данном случае являются цифровая обработка изображений и контурный анализ [47,48].

Чтобы отделить объекты от фона необходимо получить растровое изображение исследуемого параметра, например, построим карту максимальной отражаемости по данным радиолокатора (рисунок 5.16).

Подобное растровое изображение представляет собой модель некоторой поверхности, где каждый элемент помимо положения имеет собственное значение, которое может быть представлено в виде третьей координаты - амплитуды (высоты) [47,48]. Участки относительно однородного фона на растре представляют собой более или менее плоские участки на моделируемой поверхности, а области, расположенные непосредственно на границах объектов, являются областями перепадов функции растра. Это означает, что контур (граница) объекта характеризуется скачкообразным изменением значений функции растра. Следовательно, задача поиска контуров объектов на растровых изображениях - это задача поиска участков с относительно резкими перепадами высот (значений) моделируемой растром поверхности. Задача подобного рода математического анализа - хорошо изучена и решается дифференциальными методами [48]. Чтобы выделить контуры объектов, необходимо построить поле модуля градиента для функции значений растра

исходного изображения. Эта функция является зависящей от двух переменных - координат x и y.

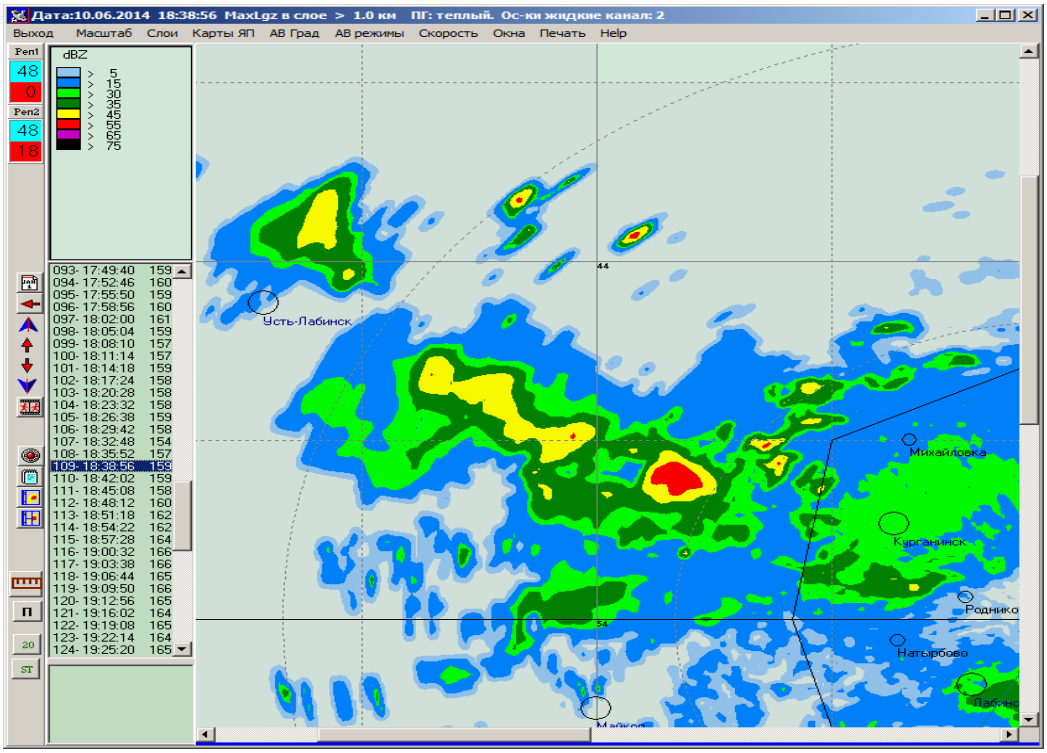


Рисунок 5.16 - Карта максимальной отражаемости, разбитая на уровни в соответствии со шкалой градаций

Градиент функции двух переменных вычисляется по формуле:

$$\nabla f(x,y) = \left\{ \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right\}, \tag{5.1}$$

а его модуль соответственно:

$$\left| \nabla f(x,y) \right| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}. \tag{5.2}$$

Однако, в данном виде эта формула неприменима, поскольку она работает с частными производными, которые не существуют в точках разрыва функции, в то время, как поле значений растра в общем случае представляет собой дискретную функцию двух переменных с множеством разрывов.

Частные производные можно получить в виде оценок:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \sim s_1(x,y) = f(x,y) - f(x-1,y)$$
$$\frac{\partial f}{\partial y} \sim s_2(x,y) = f(x,y) - f(x,y-1)$$
, (5.3)

где x,y - координаты (измеренные в пикселах) на растровом изображении.

Для получения контурного изображения часто используют метод скользящего окна, применяя при этом оператор Собела [47,48]. В таком случае оценки находят при помощи обработки маской 3x3:

$$s_1 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad s_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{5.4}$$

Чтобы максимизировать качество получаемого контурного изображения, необходимо подвергнуть исходное изображение пороговой бинаризации.

$$I_{рез}(x,y) = \begin{cases} 1, \text{если отражаемость } (I_{исх}(x,y)) > T_{\text{порог}}(x,y) \\ 0, \text{в ином случае} \end{cases}. \tag{5.5}$$

Таким образом, последовательность действий при распознавании объектов методом контурного анализа будет выглядеть следующим образом:

- получение монохромного изображения;

- бинаризация изображения;

- выделение контуров объектов;

- первичная фильтрация контуров (по периметру, площади и другим признакам);

- перебор всех найденных контуров и анализ объектов.

Пример такой обработки представлен на рисунке 5.17.

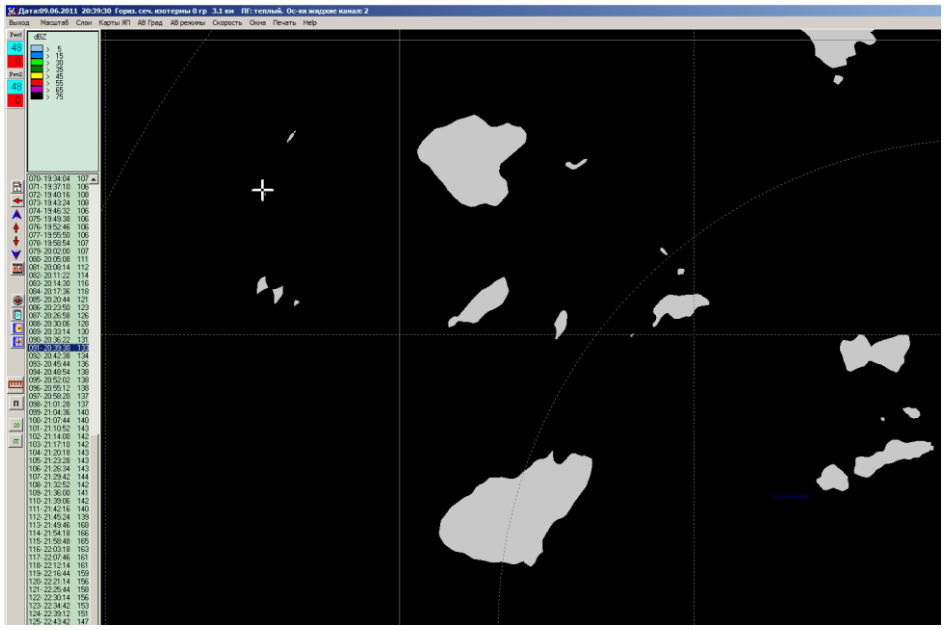


Рисунок 5.17 - Бинаризованная карта отражаемости с порогом 35 dBZ

В качестве одной из удобных форм дальнейшего анализа и сопоставления объектов можно использовать аппроксимацию полученного контура метеообразования эллипсом (рисунок 5.18).

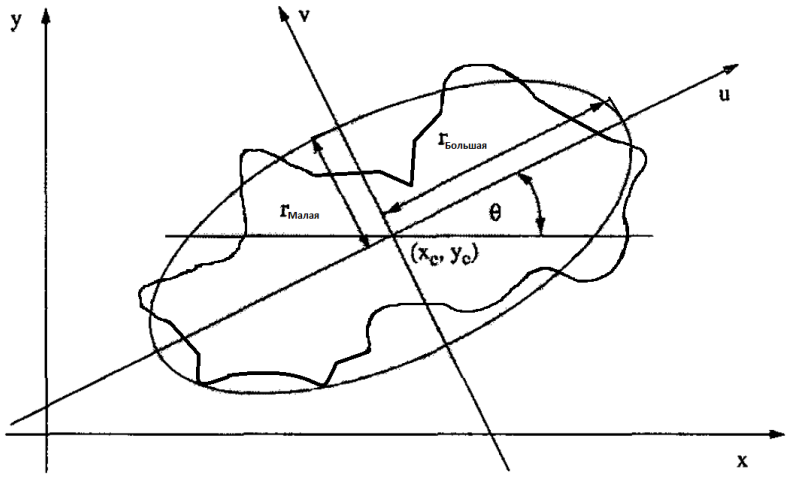


Рисунок 5.18 – Эллипс аппроксимирующий контур многоугольника

Воспользуемся пространственными и центральными моментами контура для нахождения параметров аппроксимирующего эллипса.

Моментом называют суммарную характеристика контура, рассчитанную интегрированием (суммированием) всех дискретных элементов растра контура.

Момент *m(p,q)* определяется как:

$$m(p,q) = \sum_{i=1}^{k} I(x,y) x^p y^q \quad , \tag{5.6}$$

где p и q — порядок возведения в степень соответствующего параметра при суммировании; k — число пикселей контура [47,48,159].

Например, момент *m(0,0)* — равен площади пикселей контура.

Центральные моменты вычисляются по следующей формуле:

$$m_u(p,q) = \sum_{i=1}^{k} I(x,y)(x - x_c)^p (y - y_c)^q \quad , \tag{5.7}$$

где x_c, y_c — центр масс (центр тяжести плоской фигуры):

$$x_c = \frac{m(1,0)}{m(0,0)}, \quad y_c = \frac{m(0,1)}{m(0,0)}. \tag{5.8}$$

Найдем большую и малую ось эллипса.

$$A = \frac{m_u(2,0)}{m(0,0)} - x_c^2, \quad B = 2\left(\frac{m_u(1,1)}{m(0,0)} - x_c y_c\right), \quad C = \frac{m_u(0,2)}{m(0,0)} - y_c^2. \tag{5.9}$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \sqrt{\frac{(A+C) \pm \sqrt{B^2 + (A-C)^2}}{2}}, \tag{5.10}$$

Площадь $S = ndxdy,$

Большая и малая полуоси эллипса соответственно:

$$r_{большая} = \sigma_1 \sqrt{\frac{S}{\pi \sigma_1 \sigma_2}}, \quad r_{малая} = \sigma_2 \sqrt{\frac{S}{\pi \sigma_1 \sigma_2}}. \tag{5.11}$$

Для вычисления угла наклона главной (большей) оси используем центральные моменты инерции

$$\theta = \arctan\left(\frac{2 * m_u(1,1)}{m_u(0,2) - m_u(2,0)}\right) / 2. \tag{5.12}$$

Если на изображениях I(*x,y,t-2*), I(*x,y,t-1*) и I(*x,y,t*) выделены объекты, то с учетом некоторых ограничений возможно установление соответствий между объектами, найденными на предыдущем и последующем кадрах, такой метод носит название детерминированное слежение (рисунок 5.19).

Во время выполнения алгоритма возможны следующие варианты [48]:

- появление нового объекта;
- сопоставление прослеживаемому объекту;
- разделение объекта;
- слияние объектов;
- пропадание объекта.

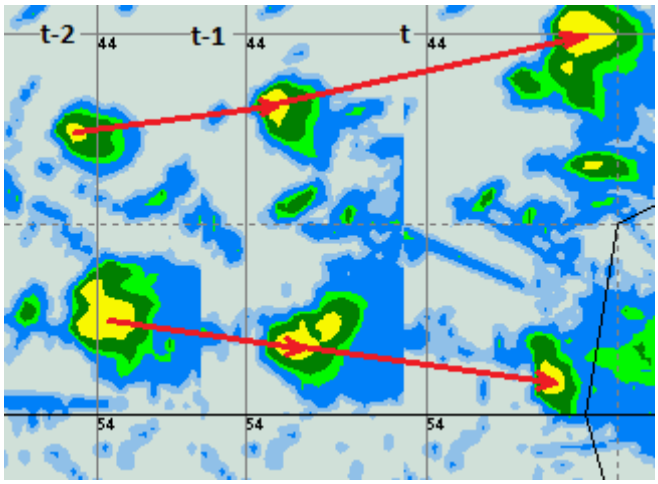


Рисунок 5.19 - Сопоставление объектов при детерминированном слежении. Объединены три картинки с двумя конвективными ячейками, наблюдаемыми через 3,5 минуты

Простейшая стратегия прослеживания в данном случае не срабатывает, поэтому вводятся различные ограничения [48]:

1) близость,
2) максимальная скорость,
3) общее движение,
4) малое изменение вектора скорости,
5) «жесткость»,

6) трендовая инертность.

Алгоритм слежения (сопровождения) позволяет получить лишь частную траекторию.

Пусть $[x_i, y_i]$ - пары координат положения объекта (точки центра масс фигуры), если количество точек больше двух и точки имеют случайную составляющую (ошибки измерения) провести линию через все точки одновременно в общем случае невозможно.

Суть метода регрессионного прогноза заключается в том, что по значениям исследуемого параметра за прошлые периоды подбирается наиболее подходящая функция и уже по ней рассчитываются прогнозные значения. При этом предполагается, что будущие значения зависят от данных прошлых периодов, имеют определенную инерцию и почти не зависят от других факторов [47,48].

Уравнение авторегрессионой зависимости чаще всего представляют в виде линейной функции:

$$Y_t = a_0 + a_1 * Y_{t-1} + a_2 * Y_{t-2} + ... + a_i * Y_{t-i} + ... + a_k * Y_{t-n}, \qquad (5.13)$$

где Y_t - прогнозируемое значение показателя Y в момент времени t; Y_{t-i} - значение показателя Y в момент времени (t-i); n - объём выборки, т.е. число известных параметров по которым строится линейная функция; a_i - *i*-й коэффициент регрессии.

Выполняется это с помощью метода наименьших квадратов, когда минимизируется сумма квадратов отклонений реально наблюдаемых значений Y от их оценок с помощью прямой линии, претендующих на то, чтобы представлять искомую регрессионную зависимость.

Аппроксимируем данные радиолокационных наблюдений за перемещением облачных ячеек линейной зависимостью:

$$y=at+b, \qquad (5.14)$$

где коэффициенты *a* и *b* вычисляются методом наименьших квадратов.

Следующий подход предполагает аппроксимацию параметров движения облака параболой.

Функция второго порядка содержит три коэффициента (a, b, c):

$$y = at^2 + bt + c. \qquad (5.15)$$

Коэффициенты определяются из условия минимума ошибки аппроксимации, в частности, сумма квадратов разностей значений функции и значений исследуемых параметров должна быть минимальной:

$$\sum_{i=1}^{n} (at_i^2 + bt_i + c - y_i)^2 \to 0 \qquad (5.16)$$

где y_i - значение показателя y в момент времени *i*; *a, b, c* - параметры аппроксимирующей функции; n - объём выборки (число известных параметров по которым строится линейная функция); t_i - номер периода от 1 до n.

В результате обработки данных получаем искомые значения параметров аппроксимирующей функции - коэффициенты *a, b, c*.

Чтобы найти прогнозные значения с помощью аппроксимирующей функции в полученное уравнение прямой (5.14) или параболы (5.15) подставляем значения прогнозируемых периодов (t), получаем необходимый результат - y(t). В качестве y(t) выступают следующие характеристики конвективных ячеек: декартовы координаты центра масс, радиолокационная отражаемость, высота облака и др.

5.4 Программное обеспечение трехмерного отображения радиолокационной информации

Последние десятилетия характеризуются быстрым развитием трехмерной компьютерной графики практически во всех сферах деятельности людей. Вместе с другими сферами быстрыми темпами развивается и внедряется в практику трехмерное представление информации с метеорологических радиолокаторов.

В ВГИ на основе библиотеки открытого доступа OpenGL [203] разработано адаптированное для задач физики облаков программное обеспечение трехмерной графики [121,122], которое способствует более качественной физической интерпретации широкого спектра геофизической информации и данных численного моделирования.

Программное обеспечение визуализации радиолокационной метеорологической информации позволяет получать новые представления о мощных грозовых облаках, их структуре, взаимодействии развивающихся конвективных ячеек (рисунки 5.20-5.21) и т.д. На рисунке 5.20 приведены траектории двух противоградовых ракет при засеве градового облака кристаллизующим реагентом.

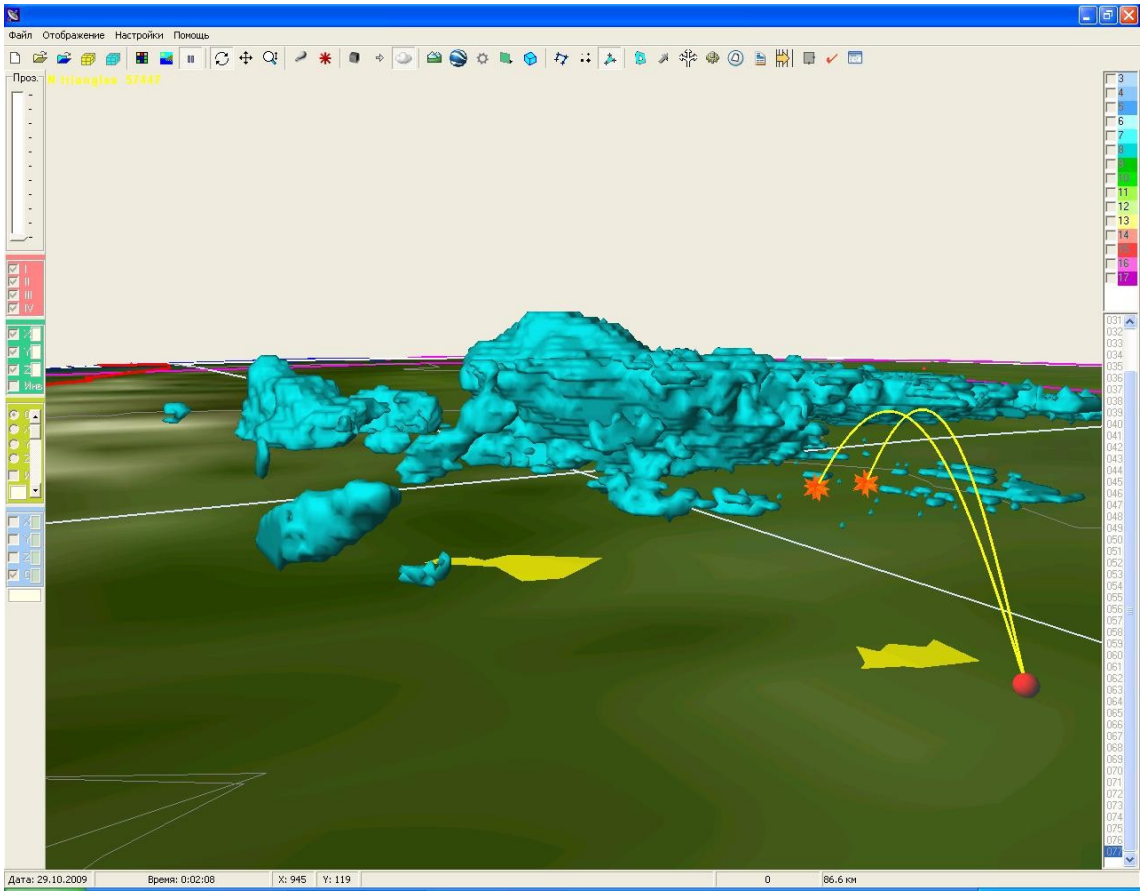


Рисунок 5.20 - Изображение градового облака в виде изоповерхности радиолокационной отражаемости на фоне цифрового глобуса. Желтые многоугольники – контуры населенных пунктов.

Построение трехмерного изображения облака в виде изоповерхностей радиолокационной отражаемости дает возможность увидеть облако как объемный объект, оценить его особенности, проследить связь с орографией. Значение этих возможностей трехмерной визуализации, ставших доступными в последние годы, весьма существенно.

Шкала градаций отражаемости (справа вверху на рисунке 5.20) дает возможность изменять отображаемое значение изоповерхности, последовательно просматривать картинки вложенных уровней, или увидеть все градации одновременно, используя вертикальный или горизонтальный разрез облака (рисунок 5.21).

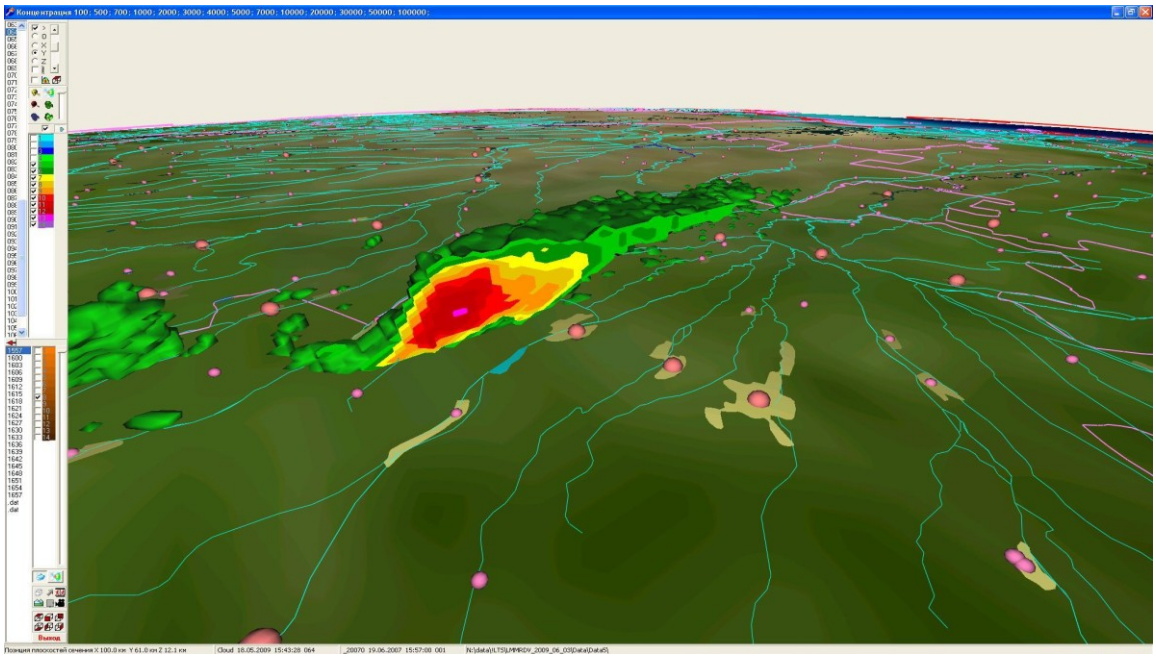


Рисунок 5.21 – Вертикальный разрез градового облака по направлению перемещения

Нанесение дополнительных слоев геоинформационных данных позволяет выводить вспомогательную информацию (населенные пункты, ракетные пункты активного воздействия на град, метеостанции и др.). На рисунке 5.22 дополнительно к трехмерному изображению облаков на подстилающей поверхности выведена еще карта максимальной

радиолокационной отражаемости в слое (карта Zmax). Приведены конвективные облака в предгорьях Северного Кавказа, которые наблюдались радиолокатором МРЛ-5 с установленной автоматизированной системой «Мерком» [151].

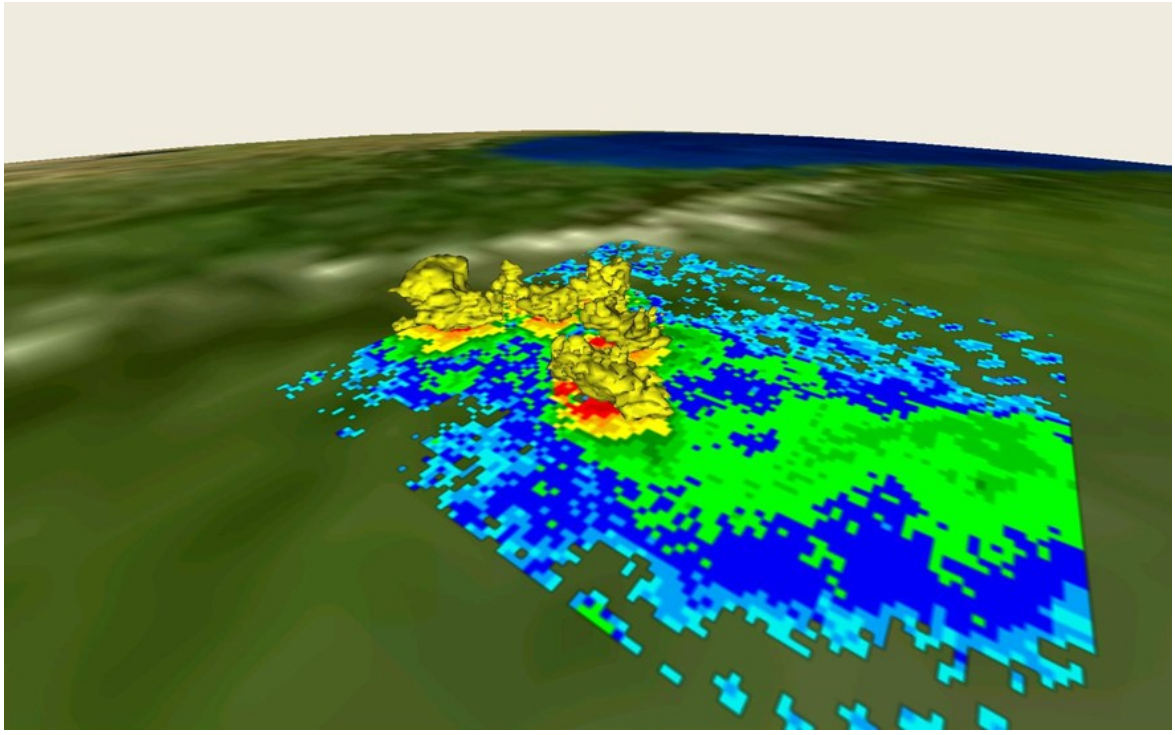


Рисунок 5.22 - Изображение конвективных облаков на фоне карты Z max на подстилающей поверхности

Трехмерные сцены позволяют просматривать данные в таком виде, который облегчает пользователю формирование представления об объемных характеристиках метеорологического объекта.

На рисунке 5.23 приведено трехмерное изображение градового облака, наблюдаемого радиолокатором МРЛ-5. На рисунке 5.24 приведены грозовые облака в районе г. Нальчик и зарегистрированные системой LS8000 грозы.

Уровень отражаемости 65 dBZ (градовый столб) выделен в трехмерном виде на рисунке 5.25. На поверхность спроецирована карта максимальной радиолокационной отражаемости Z_{max} в слое атмосферы h>= 1 км.

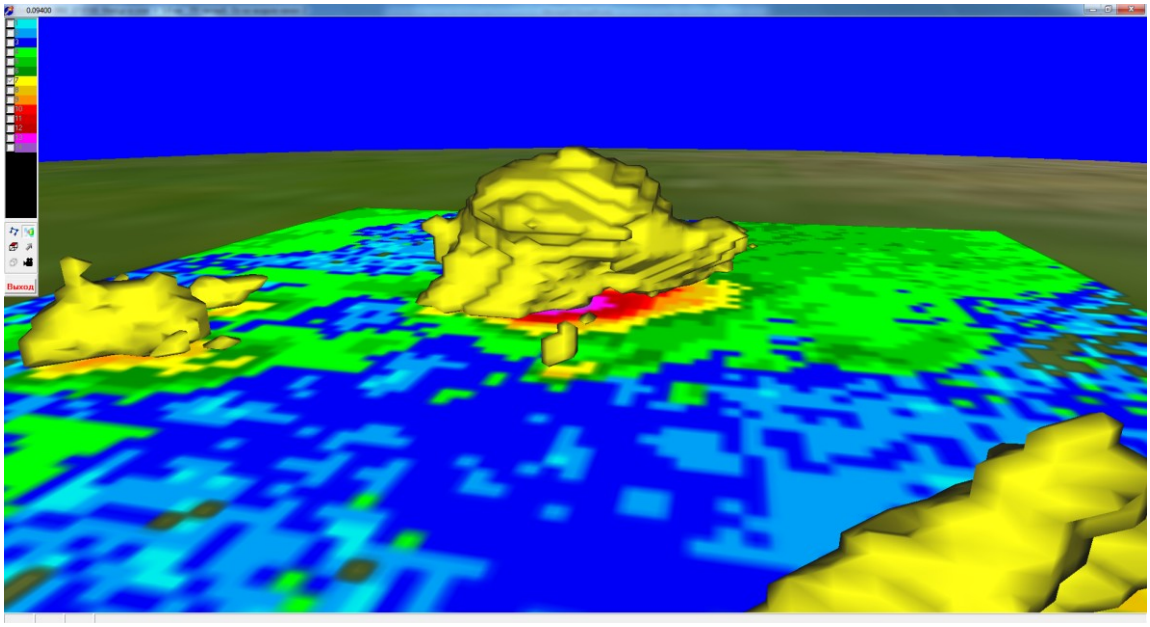


Рисунок 5.23 – Трехмерный вид градового облака по данным наблюдений МРЛ-5 СКВС

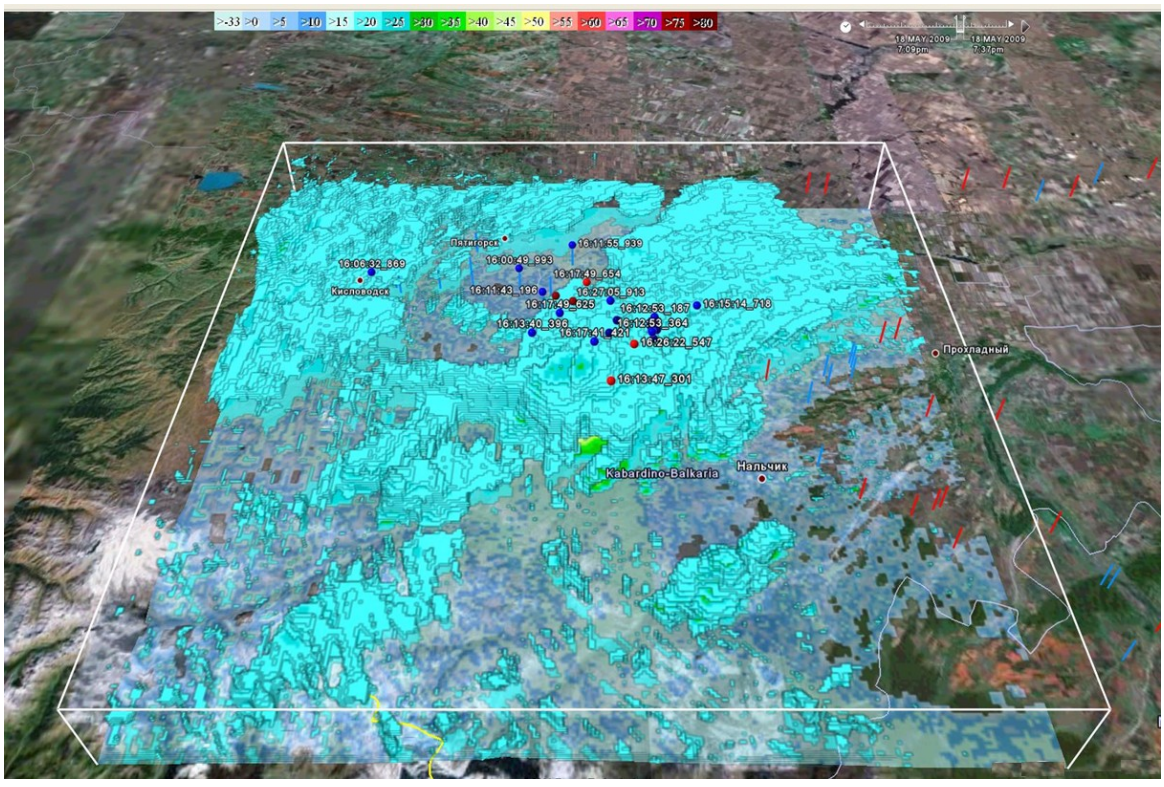


Рисунок 5.24 – Трехмерный вид облаков в КБР. Цветными точками отмечены грозы

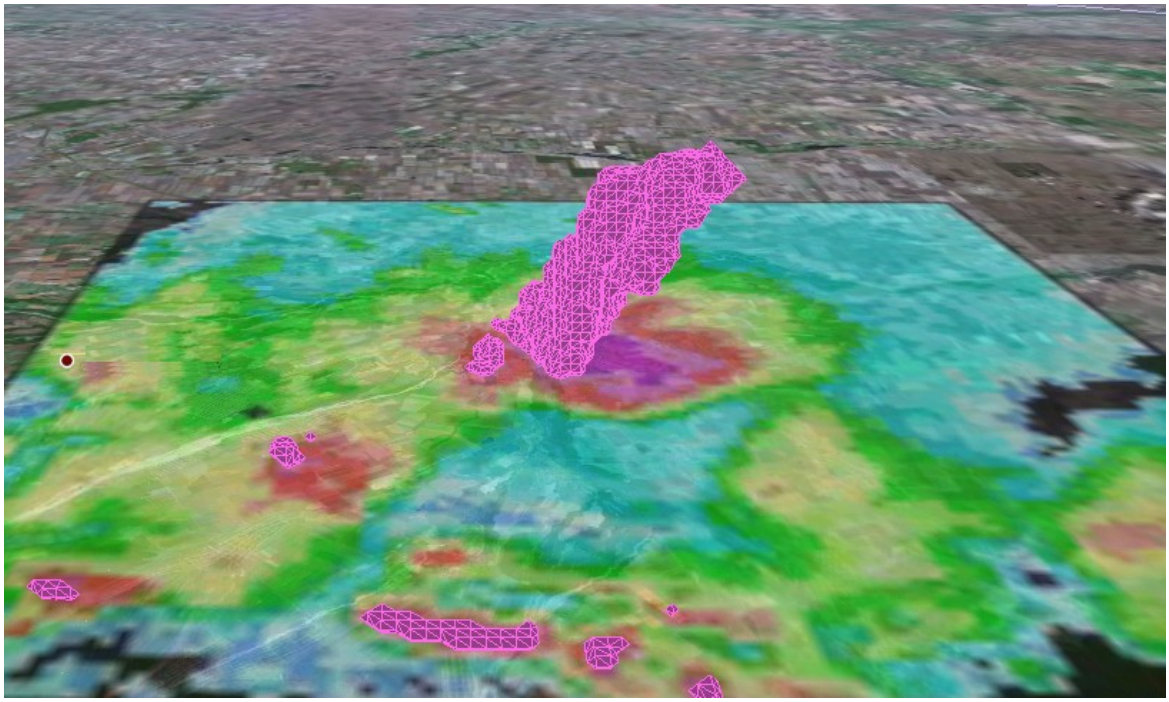


Рисунок 5.25 – Трехмерный вид градового столба в районе г. Нарткала Кабардино-Балкарской республики

Также программа 3D визуализации радиолокационной информации позволяет руководителям активного воздействия на градовые процессы выделять взаимодействующие конвективные ячейки на ранней стадии развития (рисунки 5.26, 5.27) и при необходимости сосредоточить воздействие на наиболее градоопасных из них.

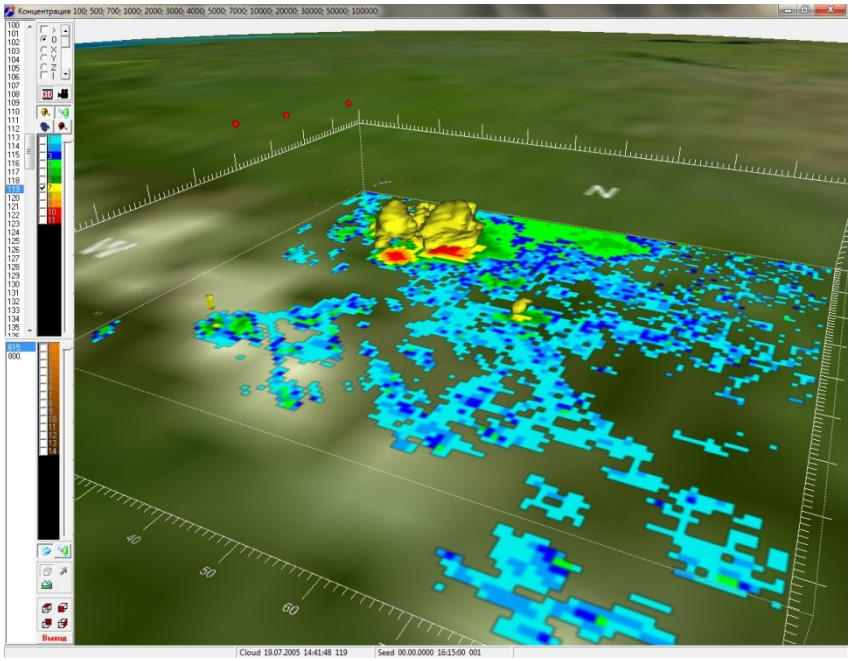


Рисунок 5.26 - Взаимодействующие ячейки в 17:17 по данным МРЛ-5 СКВС

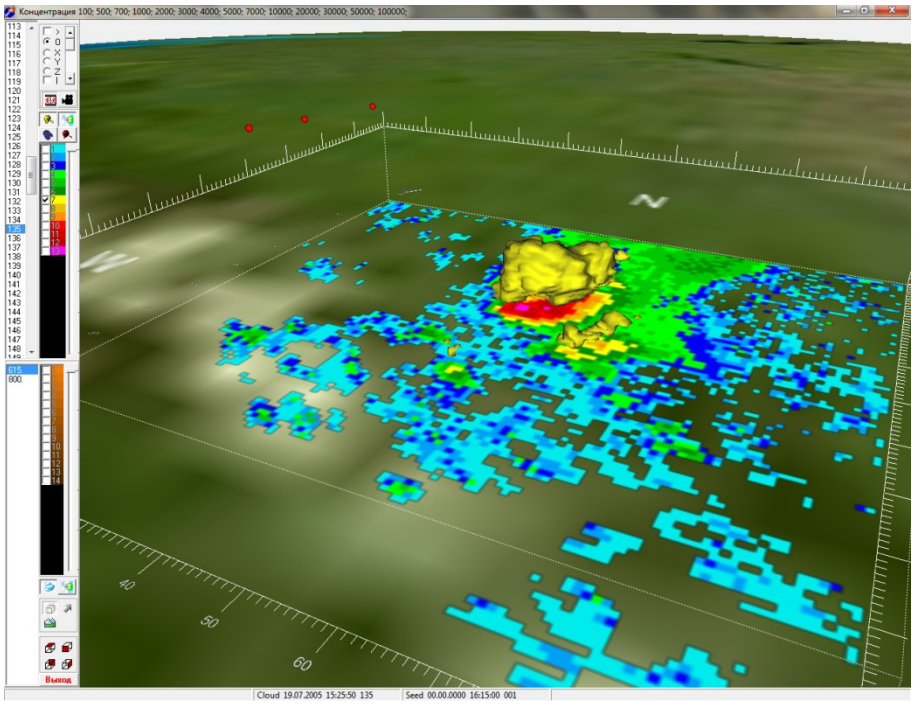


Рисунок 5.27 – Образование грозоградового облака при слиянии двух ячеек в 17:28

Таким образом, данное прикладное программное обеспечение, применяемое в военизированных службах по воздействию на

гидрометеорологические процессы, способствует повышению эффективности проводимой в южных регионах нашей страны противоградовой защиты сельскохозяйственных культур.

Выводы к главе

Разработано программно-математическое обеспечение анализа и отображения метеорологической информации нового российского доплеровского радиолокатора ДМРЛ-С. Программа «ГИМЕТ-2010» устанавливается на всех радиолокаторах разворачиваемой в настоящее время сети ДМРЛ страны.

Разработано программно-математическое обеспечение объединения радиолокационной и грозопеленгационной информации, которое отличается высокой эффективностью определения опасных явлений погоды за счет использования кроме радиолокационной, ещё информации о грозовых разрядах грозорегистрационной системы и спутниковых данных. Программное обеспечение применяется в центрах штормового оповещения и военизированных службах для формирования композитных карт опасных явлений погоды в масштабе Северо-Кавказского региона.

Программное обеспечение трехмерной визуализации радиолокационной метеорологической информации позволяет получать детальные представления о мощных грозовых облаках, их структуре, взаимодействии развивающихся конвективных ячеек. Окно трехмерного изображения облаков внедрено в программы визуализации радиолокационной информации «ГИМЕТ-2010» для ДМРЛ-С и «МЕРКОМ» для МРЛ-5.

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 проццов 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^3, напряженности поля до ± 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 и 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 $м^2/с$. В стадии максимального развития облака (в предградовой и градовой стадии) радиолокационная отражаемость увеличивается до 65-75 dBZ, коэффициент турбулентной диффузии достигает 1500 $м^2/с$ и более. Водность облака достаточно неоднородна, в центральной части облака концентрация жидкой облачной воды по результатам моделирования достигает 6 $г/м^3$ 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 ^oC. 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 °C в область с

большой водностью (>1 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абшаев, М.Т. Структура и динамика развития грозоградовых процессов Северного Кавказа// Труды ВГИ,1982, вып.53.
2. Абшаев, М.Т., Абшаев А.М., Барекова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. – Нальчик: – Печатный двор, 2014. – 508 с.
3. Аджиев, А.Х., Аджиева А.А., Чочаев Х.Х., Шаповалов В.А. Методика коррекции сигналов метеообъектов на дальностях свыше 100 км при радиолокационных наблюдениях// Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук.- 2008, Т. 10, №2. - С.86-93.
4. Аджиев, А.Х., Богаченко Е.М. Грозы Северного Кавказа. – Нальчик, 2011. – 151с
5. Аджиев, А.Х., Стасенко В.Н., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Напряженность электрического поля атмосферы и грозовые явления на Северном Кавказе// Метеорология и гидрология.- 2016, №3. - С. 46-54.
6. Аджиев, А.Х., Тамазов С.Т. Разделение электрических зарядов при кристаллизации капель воды// Метеорология и гидрология.- 1987, N7.- С.57-62.
7. Аджиева, А.А, Шаповалов В.А., Машуков И.Х. Методы обработки и представления радиолокационной метеорологической информации на территории Северного Кавказа// Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Физика атмосферы. – 2010. – С.12-17.
8. Аджиева, А.А., Машуков И.Х., Шаповалов В.А. Оценка степени градоопасности конвективных облаков радиолокационными методами// Гелиогеофизические исследования. – Вып.90. - 2011. – С.165-169.
9. Аджиева, А.А., Рогозина А.И., Шаповалов В.А., Чочаев Х.Х. Методы обнаружения и борьбы с опасными конвективными процессами на

территории Северного Кавказа// Безопасность жизнедеятельности. Приложение. - 2009, № 6. – С. 12-16.

10. Аджиева, А.А., Шаповалов В.А. Совершенствование прогнозирования и контроля развития опасных явлений погоды с использованием радиолокационных и грозопеленгационных методов на примере отдельного грозового очага // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. №1(193). 2017. - С 80-88.
11. Аджиева, А.А., Шаповалов В.А., Машуков И.Х., Скорбеж Н.Н., Шаповалов М.А. Обнаружение и распознавание опасных конвективных процессов радиотехническими средствами// Известия Высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. - №1 (179). - 2014.- С. 59-62.
12. Аджиева, А.А, Шаповалов В.А., Кластерный анализ в автоматическом выявлении и сопровождении грозовых очагов по данным грозопеленгационной сети// Инженерный вестник Дона, №2 (2016). http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3559 (дата обращения: 30.09.2017)
13. Андерсон, Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Том 1. – М.: «Мир», 1990.- 384 с.
14. Андреев, А.О., Дукальская М.В., Головина Е.Г. Облака: происхождение, классификация, распознавание. — СПб: Изд-во РГГМУ, 2007. — 228 с.
15. Андреева, Е.С. Опасные явления погоды юга России. Под. ред. Карлина Л. Н. — СПб.: Изд-во РГГМУ, ВВМ, 2006. — 216 с.
16. Анучин, М.Г., Неуважаев В.Е., Паршуков И.Э. Применение k-ε модели для описания приземного слоя атмосферы. ВАНТ сер. Математическое моделирование физических процессов. Вып. 2, 2001.- С. 11-27.
17. Аргучинцев, В.К. Динамика атмосферы.- Иркутск: Изд-во ИГУ, 2006. — 130 с.
18. Ашабоков, Б. А., Кагермазов. А.Х., Шаповалов А.В., Шаповалов В. А. Об одном подходе к формированию начальных условий при

моделировании конвективных облаков// Труды ГГО им.А.И.Воейкова, 2016. Вып.582.- С. 159-173

19. Ашабоков, Б.А. и др. Физика градовых облаков и активных воздействий на них: состояние и направления развития. / Ашабоков Б.А., и др. Федченко Л.М., Тапасханов В.О., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Макуашев М.К., Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т., Ташилова А.А., Кешева Л.А. /.- Нальчик: Печатный двор, 2013.-216 с.
20. Ашабоков, Б.А., Кулиев Д.Д., Продан К.А., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Некоторые результаты численного исследования формирования термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков// Сб. трудов VII Всеросс. конф. по атмосферному электричеству. – СПб: , 2012. – С.31-33.
21. Ашабоков, Б.А., Федченко Л.М., Куповых Г.В., Шаповалов А.В., Скорбеж Н.Н., Шаповалов В.А. Модель конвективного облака с учетом влияния физических процессов на его характеристики// Известия Высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2012, №6 (172).- С. 58-62.
22. Ашабоков, Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Езаова А.Г. Результаты моделирования влияния структуры ветра в атмосфере на процессы облакообразования // Известия КБНЦ РАН. 2014. № 4 (60). С. 21-28.
23. Ашабоков, Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Физика облаков и активных воздействий на них. – Нальчик: «Печатный двор», 2017.-240с.
24. Ашабоков, Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Разработка метода управления формированием микроструктуры градовых облаков// Сб. трудов II межд. науч. конф. с элементами науч. школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь: Изд. СКФУ, 2015. – С.208-211.

25. Ашабоков, Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Теоретические исследования механизма образования града при естественном развитии облаков и активном воздействии с целью усовершенствования метода воздействия на градовые процессы// Матер. Всеросс. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидромет. процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. - Нальчик, 2014.- С.39-49.
26. Ашабоков, Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Численные эксперименты на основе трехмерной модели конвективного облака с детальным учетом электрических процессов: формирование объемных зарядов и напряженности поля//Сборник научных трудов Высокогорного геофизического института. Уфа, 2017. - С. 12-17.
27. Ашабоков, Б.А., Шаповалов А.В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии.- Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2008.-254 с.
28. Ашабоков, Б.А., Шаповалов А.В., Кулиев Д.Д., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития// Известия Высших учебных заведений. Радиофизика. - Т. 56. 2013. № 11-12. - С. 900-907.
29. Ашабоков, Б.А., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Математическая модель градового облака с детальным расчетом электрических процессов// Матер. межд. научно-практ. конф. «Глобальные вызовы современности и проблемы устойчивого развития Юга России». – Нальчик: Изд. КБНЦ РАН, 2015. – С.273-277.
30. Ашабоков, Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Трехмерная численная модель конвективного облака с учетом электрических процессов: Некоторые результаты расчетов параметров грозоградовых облаков// Известия КБНЦ РАН. 2014. № 6 (62). - С. 9-15.

31. Ашабоков, Б.А., Шаповалов В.А., Езаова А.Г., Шаповалов М.А. Исследование образования ледяной фазы в мощных конвективных облаках на основе трехмерной численной модели// Естественные и технические науки. – 2014, № 5(73). - С.78-83
32. Базлова, Т.А., Бочарников Н.В, Брылев Г.Б. и др. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. – Л.: Гидрометеоиздат, 2002. – 331с.
33. Баранов, В.Г., Веремей Н.Е., Власенко С.С., Довгалюк Ю.А. Численная нестационарная модель электризации конвективного облака, содержащего твердые аэрозольные частицы// Вестник СПбГУ.- Серия 4: физика, химия, 1997. Вып. 3. № 18.- С. 23 - 30.
34. Бахвалов, Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. - М.: Наука, 1987.- 557 с.
35. Бейтуганов, М.Н., Белгороков Л.Г. Исследование взаимодействия двух частиц в электрическом поле// Труды ВГИ. 1987. Вып. 69. – С. 8-11.
36. Бекряев, В.И. Некоторые вопросы физики облаков и активных воздействий на них. - СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. – 336 с.
37. Белова, Л. К., Дрофа А. С. Исследование воздействия гигроскопическими реагентами на конвективное облако по результатам численного моделирования // Труды ГГО. 2016. Вып. 282. – С. 184 – 201.
38. Березин, С.Б., Каргапольцев И.С., Марковский Н.Д., Сахарных Н.А. Параллельная реализация метода расщепления для системы из нескольких GPU с применением в задачах аэрогидродинамики// Вестник Нижегородского университета им.Н.И.Лобачевского, 2012, №5(2).- С.246-252.
39. Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. - Л.: Гидрометеоиздат, 1975.- 447 с
40. Буйков, М.В., Кузьменко А.Г., Талерко Н.Н., Рухадзе И.И. Численное моделирование искусственного воздействия на смешанные

кучеводождевые облака с целью регулирования осадков// Тр. Всесоюзн. Конф., Киев, 1987.- Л.: Гидрометеоиздат, 1990.

41. Бычков, А.А., Шаповалов В.А. Исследование на основе численного моделирования эффективности воздействия на конвективные облака льдообразующими реагентами с целью искусственного увеличения осадков// Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета.- 2017. - № 49. – С. 65-72.
42. Веремей, Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО, 2016. Вып. 282. – С. 45 – 91.
43. Веремей, Н. Е., Довгалюк Ю. А., Морозов В. Н. О параметризации микрофизических процессов электризации в трехфазной модели конвективного облака // Метеорология и гидрология, 2007. № 10. С.- 42—54.
44. Веремей, Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А., Игнатьев А.А., Морозов В.Н. Исследование эволюции электрической структуры конвективного облака по данным численной нестационарной трехмерной модели // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. Т. 56, N 11 – 12, С. 889 – 899.
45. Владимиров, С. А. Численное моделирование воздействия на процесс образования осадков в конвективных облаках с помощью засева гигроскопическими аэрозолями // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С .58—69.
46. Владимиров, С. А., Пастушков Р. С. Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трёхмерное численное моделирование // Труды ГГО. 2016. Вып. 582. С. 116—127.
47. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс: пер. с англ. под ред. П. А. Чочиа.- М.: Техносфера, 2006. - 1072 с.

48. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах. / И.С. Грузман и др. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.- 168 с.
49. Деннис, А. Изменение погоды засевом облаков: Пер. с англ./ - М.: Мир, 1983.- 272 с.
50. Довгалюк, Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров С. А., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Шаповалов А. В. Концепция разработки численной нестационарной трехмерной модели эволюции осадкообразующего конвективного облака в естественных условиях и при активных воздействиях// Труды ГГО, 2016. Вып. 282. – С. 7 – 44.
51. Довгалюк, Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров С. А., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Шаповалов А. В. Перспективы развития численной трехмерной модели конвективного облака// Труды ГГО, 2016. Вып. 282. – С. 202 – 213.
52. Довгалюк, Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. Второе издание. — СПб: Моби Дик. 2013. - 220 с.
53. Довиак, Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. - Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
54. Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С.- http://www.lemz.ru/ views/solutions/ meteo/ meteo (дата обращения: 15.10.2017)
55. Дрофа, А. С. Исследование воздействия гигроскопическими частицами на теплое конвективное облако по результатам численного моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2010. Т. 46. № 3.- С. 348-362.
56. Дрофа, А. С. Исследование возможности стимулирования гигроскопическими частицами осадков из теплых конвективных облаков по результатам численного моделирования// Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2008. Т. 44. N 4. - С. 435-449.

57. Ермаков, В.И., Стожков Ю.И. Физика грозовых облаков.- Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, М., 2004 г.
58. Ефремов, В.С., Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Лаврукевич В.В., Седлецкий Р.М. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов// Журнал радиоэлектроники. 2009. № 10.
59. Закинян, Р.Г. К теории роста градин// Метеорология и гидрология, 2000. № 10.- С. 59-67.
60. Игнатьев А.А. LES модель полей конвективных облаков // Труды ГГО. – 2011. – №. 564. – С. 104-125.
61. Имянитов, И.М. Строение и условия развития грозовых облаков// Метеорология и гидрология.- 1981. - №3 - С. 5-17.
62. Имянитов, И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М. Электричество облаков. – Л.:Гидрометеоиздат, 1971. – 93 с.
63. Кагермазов, А.Х. Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений.-Нальчик: «Печатный двор», 2015.-216 с.
64. Калов, Р.Х. Исследование влияния электрических зарядов и электрических полей на эффективность льдообразующих реагентов. Автореферат канд. диссертации. – Нальчик, 2001.
65. Каменецкий Е.С. Моделирование полей скорости ветра и температуры воздуха на территории Северной Осетии-Алании // Вестник Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л. Хетагурова. Естественные науки. – 1999. – С. 96-98.
66. Каменецкий, Е.С. Математические модели атмосферы над сложной подстилающей поверхностью. – Владикавказ: ВНЦ РАН и РСО-А, 2007.– 168 с.
67. Качурин, Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. - Л.: Гидрометеоиздат, 1990. - 464 с.

68. Кашлева, Л.В. Атмосферное электричество. Учебное пособие. - СПб.: изд. РГГМУ, 2008. - 116 с.
69. Керимов, А.М., Корчагина Е.А., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Модели и методы расчета мезомасштабного распространения примесей в атмосфере. - Нальчик: Изд. КБНЦ РАН, 2008.- 108 С.
70. Керимов, А.М., Корчагина Е.А., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Численное моделирование распространения атмосферных примесей в горно-степной зоне// Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. - 2006, №3.- С.86-90.
71. Коган, Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. Численное моделирование облаков. - М., 1984.-186 с.
72. Колосков, Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов.- СПб.: Изд. РГГМУ, 2012.- 342 с.
73. Корчагина, Е.А. Исследование микрофизических и электрических процессов в конвективных облаках на основе численного моделирования : дисс.. канд. физ.-мат. наук. - Нальчик, 2002. - 148 с.
74. Корчагина, Е.А., Гажев А.А., Шаповалов В.А. Моделирование формирования термодинамических и микроструктурных параметров кучево-дождевых облаков с учетом электризации облачных частиц// Матер. второй межд. конф. «Моделирование устойчивого регионального развития». - Т.2. - Нальчик, 2007.- С. 169-174.
75. Корчагина, Е.А., Керимов А.М., Шаповалов В.А. Моделирование микрофизических процессов в облачной атмосфере// Известия КБНЦ РАН, 2006, № 2(16). - С. 50-58.
76. Котов, Г.В., Фисенко С.П. Моделирование распространения облака примеси под действием ветра в приземном слое // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84. – №. 3. – С. 535-539.
77. Красногорская, Н.В. Влияние электрических сил на коагуляцию частиц сравнимых размеров// ИАН СССР. ФАО, 1965. Т.1. - С. 339-345.

78. Красногорская, Н.В., Неизвестный А.И. Экспериментальное исследование эффективности столкновения и слияния заряженных капель равных размеров// Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1973. - Т.9. - №4. - С.399-410.
79. Куповых, Г.В., Ашабоков Б.А., Бейтуганов М.Н., Шаповалов А.В., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков// Изв. высших учебных заведений. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки.- 2012. № 6. - С. 65–68.
80. Левин, Л.М. Электрическая коагуляция облачных капель// Тр. Эльбрусской высокогорной экспедиции, 1961, Т.2. – С. 5-42.
81. Левин, Л.М., Седунов Ю.С. Гравитационная коагуляция заряженных облачных капель в турбулентной среде// Труды ИПГ.-1967. - Вып.9. – С.3-16.
82. Мазин, И.П., Шметер С.М. Облака, строение и физика образования. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 280 с.
83. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики. — М.: Наука, 1989. - 608с.
84. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостьянов В.И. Облака и климат. - Л.: Гидрометоиздат. - 1986. - 512 с.
85. Машуков, Х.М., Зекореев Р.Х., Машуков Х.Х. Ракетные измерения напряженности электрического поля в грозовых облаках// Всерос. конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидромет. процессы, Нальчик, 2001. - С.46-47.
86. Машуков, И.Х., Шаповалов В.А., Шаповалов М.А., Аджиева А.А. Методы дистанционного обнаружения интенсивных атмосферных вихрей с помощью допплеровских метеорологических радиолокаторов// Известия КБНЦ РАН.- 2014. - № 6 (62).-С. 93-98.
87. Мейсон, Б. Дж. Физика облаков.- Л.: Гидрометеоиздат, 1961. – 542 с.

88. Методические указания. Планирование и проведение работ по искусственному увеличению атмосферных осадков самолетными методами. – М., ЦАО, 1999. - 34 с.
89. Михайловский Ю. П. Эмпирическая модель электрически активных конвективных облаков и возможности ее использования для тестирования численной модели // Труды НИЦ ДЗА. – 2002. – №. 4. – С. 66.
90. Монин, А. С., Яглом А. М., Статистическая гидромеханика. В 2-х ч. — Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат , Ч. 1, 1992. — 695 с; Москва, Наука Ч. 2, 1967. — 720 с.
91. Мордвинов, В.И. Численные методы анализа и прогноза погоды Учебное пособие. — Иркутск: Изд-во Иркутского гос. университета, 2009. - 143 с.
92. Морозов, В.Н. Роль ледяной фазы в генерации электрических зарядов и полей в электроактивной зоне грозового облака// VI российская конференция по атмосферному электричеству, 1-7 октября 2007г., Нижний Новгород, с. 120-121.
93. Морозов В. Н., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А. Моделирование процессов электризации в трехмерной численной модели осадкообразующего облака (обзор) // Труды ГГО. – 2009. – №. 559. – С. 134-160.
94. Мучник, В.М. Физика грозы. - Л.: Гидрометеоиздат, 1974. - 351 с.
95. Обухов, А. М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 1988.- 414 с. ISBN 5-286-00059-2
96. Параллельное программирование : Учеб.пособие / Л. Ю. Катаева, А. В. Романов, Н. А. Романова ; НГТУ им.Р.Е.Алексеева. -Н.Новгород : [Б.и.], 2011. -137 с. :
97. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA : Учеб.пособие / А. Б. Боресков и др./. -М. : Изд-во МГУ, 2012. - 334 с.
98. Пастушков, Р. С. Модель активных воздействий на конвективные облака льдообразующими аэрозолями. Современное состояние и перспективы развития // Труды ГГО. 2016. Вып. 582.- С. 128—157.

99. Пастушков, Р. С. О влиянии вертикального сдвига ветра на развитие конвективной облачности// Известия АН СССР. ФАО. 1973. Т. IX. № 1.- С. 12—26.
100. Пастушков, Р. С. Численное моделирование активных воздействий на конвективные облака: актуальные направления, нерешенные задачи, возникающие вопросы (по публикациям 2007—2010 гг.) / Докл. Всеросс. Конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидромет. процессы. Нальчик, 24—28 октября 2011 г. — Нальчик: ООО «Печатный двор». 2013.- С. 16—25.
101. Пастушков, Р.С. Численное моделирование взаимодействия конвективных облаков с окружающей их атмосферой// Труды ЦАО, 1972. Вып.108. – С. 93-97.
102. Пермяков, Г.Н. Атмосферные явления природы и их регулирование.- СПб. : Нестор-История, 2012. - 100 с.
103. Першина, Т.А., Шлыков В.В., Авраменко Р.Ф., Николаева В.И., Щукин Г.Г., Стасенко В.Н. Исследование влияния высоковольтного высокочастотного разряда на искусственный туман// Тр. НИЦ ДЗА, 1997. Вып.1(546).- С.62-67.
104. Поташник, Э.Л., Кузнецов А.Д. Математическое моделирование облачных процессов.- СПб: Изд. РГГМУ, 2010. - 444 с.
105. Роджерс, Р.Р. Краткий курс физики облаков. -Л., Гидрометеоиздат, 1979. - 230 с.
106. Розенберг, В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. - Л.: Гидрометеоиздат, 1972. - 348с.
107. Рубинштейн, К.Г., Егорова Е.Н. Влияние межгодовой аномалии температуры поверхности океана на изменчивость атмосферы (результаты численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России)// Метеорология и Гидрология. №2. 2001.- С. 5 - 16.

108. Рубинштейн, К.Г., Оганесян В.В., Грачев Н.В. Воспроизведение приземной температуры воздуха и ее изменчивости//Метеорология и Гидрология, №12, 2004.- С. 42-51.
109. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. -Л.: Гидрометеоиздат, 1993. - 358 с.
110. Рязанов, В.И., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Моделирование распространения примесей в атмосфере с учетом локальных метеорологических условий.// Сборник научных трудов Высокогорного геофизического института. Уфа, 2017.- С. 17-23.
111. Сенов, Х.М. Математическая модель ослабления и поглощения электромагнитного излучения в облаках// Тр. ВГИ, 2001. Вып. 91. - С. 130 - 136.
112. Сергеев, Б.Н., Смирнов В.И. Численное моделирование микрофизических процессов в капельных конвективных облаках// Труды ЦАО, 1980. Вып.137.- С.3-26.
113. Синькевич, А. А., Довгалюк Ю. А. Коронный разряд в облаках. // Радиофизика. Т. LVI. 2013. № 11—12.- С. 1-12.
114. Стасенко, В.Н., Щукин Г.Г. Методология исследования электричества грозовых облаков и активных воздействий на них//Тр. НИЦ ДЗА, 2000. Вып.2(548). - С. 24-33.
115. Степаненко, В.Д., Довгалюк Ю.А., Синькевич А.А., Веремей Н.Е., Пономарев Ю.Ф., Першина Т.А. Исследование влияния электрических разрядов на фазовые и микроструктурные преобразования воды в облаках// Метеорология и гидрология, 2002.- №3.- С. 39 -49.
116. Федченко, Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. – М.: Гидрометеоиздат, 1991. – 425 с.

117. Хайрутдинов, М.Ф., Хворостьянов В.И. Моделирование искусственного увеличения осадков из орографических облаков при периодическом засеве углекислотой с самолета// Труды ЦАО, 1991. Вып.175.- С. 91-102.
118. Чалмерс, Дж. Атмосферное электричество. Пер. с англ.- Л.: Гидрометеоиздат. 1974.-421 с.
119. Шаповалов, А.В., Пашкевич М.Ю., Рязанов В.И., Шаповалов В.А., Березинский Н.А., Шереметьев Р.В., Камруков А.С. Моделирование электрических процессов в грозах в северо-кавказском регионе// Геология и геофизика Юга России. 2017. № 1.- С. 94-101.
120. Шаповалов, А.В., Рязанов В.И., Шаповалов В.А. Комплексная обработка радиолокационной и грозопеленгационной информации// Материалы XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» / под общ. ред.Ю.В. Кулешова. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017. – Выпуск 12. – Том 2. – С. 131 -134
121. Шаповалов, А.В., Шаповалов В.А. Результаты разработки программного обеспечения трехмерного представления геофизической информации// Матер. Всеросс. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидромет. процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. - Нальчик, 2014.- С.100-107.
122. Шаповалов, А.В., Шаповалов В.А. Трехмерная визуализация геофизической информации для решения прикладных задач// Наука. Инновации. Технологии, 2014. № 1. -С. 65-71.
123. Шаповалов, А.В., Шаповалов В.А., Езаова А.Г., Продан К.А. Моделирование спектров частиц в конвективных облаках со смешанным фазовым составом и их радиационных свойств// Известия КБНЦ РАН. - 2013. - № 5(55).- С.63-72.
124. Шаповалов, А.В., Стасенко В.Н, Кравченко Н.А., Лашманов Ю.К., Шаповалов В.А., Скорбеж Н.Н. Комплексная обработка информации метеорологических радиолокаторов и систем грозопеленгации// Сб.

трудов II межд. науч. конф. с элементами науч. школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь: Изд. СКФУ, 2015. – С.285-289.

125. Шаповалов, А.В., Шаповалов В.А., Рязанов В.И. Математическая модель распространения примесей в ближней зоне при работе ракетных двигателей// Наука. Инновации. Технологии, 2017. № 2.- С. 87-96.
126. Шаповалов, А.В., Шаповалов В.А., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н. Программное обеспечение приема и представления информации нового российского ДМРЛ-С// Матер. Всеросс. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидромет. процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. – Нальчик, 2014. – С.141-148.
127. Шаповалов, В.А. Цифровая обработка данных с применением фильтра Калмана // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и производства» 2017.- С. 70-73.
128. Шаповалов, В.А. Численное исследование микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков/ В.А. Шаповалов // Процессы в геосредах. - 2018. - № 1 (14). - С. 804-810.
129. 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.
130. 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.
131. Шаповалов, В.А. Численная модель переноса и диффузии консервативной легкой примеси при заданном поле скорости ветра//

Матер. Региональной научно-практ. конф. «Проблемы информатизации общества и образования».- Нальчик, 2004. – С.52-54.

132. Шаповалов, В.А., Аджиева А.А. Математическое моделирование электрических процессов в конвективных облаках// Матер. Межд. 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, 17-22 мая 2009. - С.247-249.
133. Шаповалов, В.А., Аджиева А.А., Машуков И.Х. Опасные конвективные процессы на территории Северного Кавказа// «Экологические проблемы современности» Международный научно-практический семинар. – Майкоп. 12-15 мая 2009 г.- С. 9-18.
134. Шаповалов, В.А., Машуков И.Х., Аджиева А.А. Влияние возмущений погоды на приземную напряженность электрического поля атмосферы// 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. 184-186
135. Шаповалов, В.А., Машуков И.Х., Аджиева А.А. Об одном методе расчета микрофизических процессов в конвективных облаках// Матер. межд. научно-практ. конф. «Глобальные вызовы современности и проблемы устойчивого развития Юга России». – Нальчик: Изд. КБНЦ РАН, 2015. – С.313-318.
136. Шаповалов, В.А., Машуков И.Х., Продан К.А., Колычев А.Г., Шаповалов М.А. АРМ обнаружения и предупреждения об опасных быстроразвивающихся конвективных явлениях на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов// Матер. Межд. симпозиума «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», Т.2, - Нальчик, 2013. - С. 213-216.

137. Шаповалов, В.А., Машуков И.Х., Продан К.А., Скорбеж Н.Н., Шаповалов М.А. Некоторые результаты численного моделирования микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков// Матер. Межд. симпозиума «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели», Т.2, - Нальчик, 2013. - С. 216-219.
138. Шаповалов, В.А., Продан К.А., Машуков И.Х., Шаповалов М.А., Скорбеж Н.Н. Исследование формирования электрических характеристик конвективных облаков на основе трехмерной модели с детальной микрофизикой//Конф. молодых ученых Высокогорного геофизического института, посвященной 100-летию профессора Г.К.Сулаквелидзе. – Нальчик, 2013. – С.6-8.
139. Шаповалов, В.А., Созаева Л.Т., Шаповалов М.А. Расчет поляризационных характеристик частиц осадков с использованием данных о спектрах капель, полученных по трехмерной модели конвективного облака// Матер. Всеросс. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидромет. процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. – Нальчик, 2014. – С.154-162.
140. Шаповалов, В.А., Шаповалов М.А. Исследование быстроразвивающихся конвективных процессов в Северо-Кавказском регионе РФ// Сборник научных трудов Высокогорного геофизического института.- Уфа, 2017.- С. 23-29.
141. Шаповалов, В.А., Шаповалов М.А. Распознавание опасных конвективных процессов с применением алгоритмов нейронных сетей (Neural Network) и компьютерного зрения (Computer Vision)// Матер. Всеросс. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидромет. процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, Нальчик, 2014.
142. 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.

143. 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.
144. 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
145. Шаповалов, А.В., Шаповалов В.А., Рязанов В.И. Исследование распространения в ближней зоне продуктов работы ракетных двигателей // Успехи современной науки и образования. Том 9, №4. 2017. - С. 201-206.
146. 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.
147. 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.
148. 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.
149. 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.

150. 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.
151. Шаповалов, А.В. Программа для приёма, анализа и отображения радиолокационной метеорологической информации радиолокаторов МРЛ-5 противоградовых 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.
152. Шишкин, Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество. — Л.: Гидрометеоиздат,1964.- 351 с.
153. Шметер, С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 287 с.
154. Шхануков-Лафишев, М.Х., Баззаев А.К., Гутнова Д.К. Локально-одномерная схема для параболического уравнения с нелокальным условием// Журнал вычислительной математики и математической физики, 2012, т.52, №6. - С. 1048-1057.
155. Щукин, Г.Г., Шаповалов В.А. Численное моделирование параметров конвективного облака с учетом электрических процессов// Матер. 6-й Российской конф. по атмосферному электричеству.- Н.Новгород, 1-6 октября 2007. – С. 124-125.
156. Яненко, Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. - Новосибирск: Наука, 1967. - 196 с.

157. Adzhiev, A.K., Stasenko, V.N., Shapovalov, A.V., Shapovalov, V.A., 2016: Atmospheric electric field strength and thunderstorms in the North Caucasus. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, Vol. 41, No. 3, pp. 186–192.

158. Adzhieva, A.A., Shapovalov, V.A., Mashukov, I.Kh., 2017: Local Sensing of Atmospheric Electric Field around Nalchik City. Proc. SPIE 10215, Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XIV, 102150W (3 May 2017); doi: 10.1117/12.2279940.

159. Adzhieva, A.A., Shapovalov, V.A., Boldyreff, A.S., 2017: 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.

160. Altaratz, O., Reisen T., Levin Z. Simulation of electrification of winter thunderstorm using the three-dimensional Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) model: Single cloud simulation. *J. Geophys. Res.,* 2005, vol. 110, D20205, doi: 10.1029/2004. JD 005616.

161. Arakawa, A. The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. *J. Clim.* 2004;17(13):2493–2525.

162. Ashabokov, B.A., Shapovalov, A.V., Kuliev, D.D., Prodan, K.A., Shapovalov, V.A., 2014: 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), P. 811-817

163. Barthe, C., G. Molinie, and J.P. Pinty, 2005: Description and first results of an explicit electrical scheme in a 3D cloud resolving model. Atmospheric Research, 76(1–4), 95–113.

164. Barthe, C., M. Chong, J. P. Pinty, C. Bovalo, and J. Escobar, 2012: CELLS v1.0: updated and parallelized version of an electrical scheme to simulate multiple electrified clouds and flashes over large domains. Geosci. Model Dev., 5, 167–184

165. Behrens, J. Adaptive Atmospheric Modeling: Key Techniques in Grid Generation, Data Structures, and Numerical Operations with Applications.- Springer-Verlag Berlin, 2006, 207 pp.
166. Benmoshe, N., Khain A.P. The effects of turbulence on the microphysics of mixed-phase deep convective clouds investigated with a 2D cloud model with spectral bin microphysics// Journal of Geophysical Research, 2013 118, 1–15
167. Berry, E.X., Reinhardt R.L. An analysis of cloud drop growth by collection. Part I. Double distributions// J.Atmos.Sci., 1974. V.31, №7 - P.1825-1831.
168. Betz, H.D., Schumann U., Laroche P. Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research// Springer Science+Business Media, 2009, - 641 pp.
169. Braham, R.R. Precipitation enhancement - A scientific challenge. *Meteor. Monogr., AMS,* 1986, V. 21. - 171 p.
170. Brown, P.S., Jr., Analysis and Parameterization of the Combined Coalescence, Breakup and Evaporation Processes. *J. Atmos. Sci.*, 1993, V.50. - P. 2940-2951.
171. Bychkov, A. A., Shapovalov, V.A., 2017: 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).- P. 13142-13149
172. Chiu, C.S. Numerical Study of Cloud Electrification in an Axisymmetric Time-Dependent Cloud Model// J.Geoph.Res., 1978. V.83, No.10. - P.5025 - 5049.
173. Clark, T. Numerical Simulation with a Tree-Dimention Cloud Model: lateral Boundary Condition Experiments and Multiceller Severe Storm Simulations// J.Atm. Sci, 1979, V.36, № 11. – P. 2191-2215.
174. Collins, W.D. et al. Description of NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). - NCAR Technical Note, NCAR/TN-464+STR, 2004, 226 pp.

175. Cotton, W. R., Stephen M. A., Nehrkorn T., Tripoli G. J. (1982). The Colorado State University three-Dimensional cloud mesoscale model. Part II: An ice phase parameterization // J. Rech. Atmos. V. 16. №. 3. P. 295—320.
176. Cotton, W.R. and coauthors. RAMS. Current status and future directions// Meteor. Atmos. Phys. – 2001. – V. 82. – P. 5–29.
177. Crow, E. L., P. W. Summers, A. B. Long, C. A. Knight, G. B. Foote and J. E. Dye, 1976: National Hail Research Experiment Randomized Seeding Experiment 1972–1974. Vol. 1, National Center for Atmospheric Research, 260 pp.
178. Davydenko, S.S., Mareev E.A., Marshall T.C., Stolzenburg M. On the calculation of electric fields and currents of mesoscale convective systems and their influence on the global electric circuit. Proc. of 12-th International Conference on Atmospheric Electricity. 2003. P. 697–700.
179. Emersic, C., P. L. Heinselman, D. R. MacGorman, and E. C. Bruning Lightning activity in a hail-producing storm observed with phased-array radar// Mon. Wea. Rev., 2011, 139. - P. 1809–1825.
180. Ernvik, A., 2002: 3D Visualization of Weather Radar Data. http://www.iz3mez.it/wp-content/library/ebook/3D%20Visualization%20of%20Weather%20Radar%20Data%20-%20A.%20Ernvik%20(2002)%20WW.pdf (дата обращения: 10.10.2017)
181. Fan, J., et al. Dominant role by vertical wind shear in regulating aerosol effects on deep convective clouds. J Geophys Res. 2009;114(D22):D22206.
182. Fankhauser, J.C. Structure of an evolving hailstorm/ Pt. II: Thermodynamic structure and airflow in the environment.-Mon. Wea. Rev., 1976. v. 104.№ 5. p.576-587.
183. Farley, R.D., and Orville H.D., 1986: Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth. Part I: Preliminary model verification and sensitivity tests. J. Climate Appl. Meteor., 25, 2014–2035.

184. Fierro, A.O., E.R. Mansell, D.R. MacGorman, and C.L. Ziegler, 2013: The Implementation of an Explicit Charging and Discharge Lightning Scheme within the WRF-ARW Model: Benchmark Simulations of a Continental Squall Line, a Tropical Cyclone, and a Winter Storm. Mon. Wea. Rev., 141, 2390–2415, https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00278.1

185. Gardiner, B., Lamb D., Pitter R.L., Hallett J. Measurements of Initial Potential Gradient and Particles Charges in a Montana Summer Thunderstorm// J. Geophys. Res., 1985. Vol. 90. No. D4. P. 6079-6086.

186. Gaskell, W. 1981. A laboratory study of the inductive theory of thunderstorm electrification. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 107:454, 955-966.http://dx.doi.org/10.1002/qj.49710745413

187. Grützun, V., Knoth, O. and M. Simmel, 2008: Simulation of the influence of aerosol particle characteristics on clouds and precipitation with LM–SPECS: Model description and first results. Atmos. Res., 90:233–242.

188. Hager, W., Nisbet J., Kasha J. The evolution and discharge of electric fields within a thunderstorm// Journal of Computational Physics.- 1989, 82:1, 193-217.http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991%2889%2990042-9

189. Hansen, T., T. LeFebvre, et al, 2010, Hazard Information Services vision, presented at 26th Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, American Meteorological Society, Atlanta, GA, January 17-21, 2010.

190. Hashino, T., G. J. Tripoli (2011), The Spectral Ice Habit Prediction System (SHIPS). Part IV: Box Model Simulations of the Habit-Dependent Aggregation Process, J. Atmos. Sci., 68:1142-1161. DOI:10.1175/2011JAS3667.1.

191. Heldson, J.H., Wojeik W.A., Farley R.D. (2001). An examination of thunderstorm charging mechanisms using a two-dimensional storm electrification model// J. Geophys. Res. V. 106, No. 1. P. 1165 — 1192.

192. Helsdon, J.H., Farley R. D. (1987) A numerical modeling study of a Montana thunderstorm: 2. Model results versus observations involving electrical aspects. Journal of Geophysical Research 92:D5, 5661.

193. Hermes, L. G., A., Witt, S. D. Smith, et al., 1993: The gust front detection and wind-shift algorithms for the terminal Doppler Weather Radar System. J. Atmos. Oceanic Technol., 10, 693–709.
194. Houze, R.A. Cloud Dynamics.- International Geophysics Series 1993, Volume 53. Academic Press, New York, London, 1993. – 605 pp.
195. Hsie, E.Y., Farley R.D., Orville H.D. Numerical Simulation of Ice-Phase Convective Cloud Seeding// J. Appl. Meteor. – 1980. – V. 19. – P. 950–977.
196. http://docs.nvidia.com/cuda/cuda-compiler-driver-nvcc/index.html (дата обращения: 15.10.2017)
197. http://www.de.selex-es.com/capabilities/meteorology/solutions/meteorology-1 (дата обращения: 15.10.2017)
198. http://www.grlevelx.com (дата обращения: 15.10.2017)
199. http://www.vaisala.com/en/products/weatherradars/Pages/WRM100.aspx (дата обращения: 15.10.2017)
200. http://www.vaisala.ru/ru/meteorology/products/thunderstormandlightningdetectionsystems/lightningsensors/Pages/LS8000.aspx (дата обращения: 15.10.2017)
201. http://wxanalyst.com/radar/ (дата обращения: 15.10.2017)
202. https://software.intel.com/en-us/parallel-studio-xe (дата обращения: 15.10.2017)
203. https://www.opengl.org/resources/libraries/ (дата обращения: 15.10.2017)
204. Iguchi, T., T. Matsui, J. J. Shi, W.-K. Tao, A. P. Khain, A. Hou, R. Cifelli, A. Heymsfield, and A. Tokay (2012), Numerical analysis using WRF-SBM for the cloud microphysical structures in the C3VP field campaign: Impacts of supercooled droplets and resultant riming on snow microphysics, J. Geophys. Res., 117,
205. Iguchi, T., T. Matsui, W. Tao, A. Khain, V. Phillips, C. Kidd, T. L'Ecuyer, S. Braun, and A. Hou (2014), WRF-SBM simulations of melting layer structure 125 in mixed-phase precipitation events observed during LPVEx, J. Appl. Meteor. Climatol. 53, 2710-2731

206. Illingworth, A. J., Latham J. (1977) Calculations of electric field growth, field structure and charge distributions in thunderstorms. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 103:436, 281-295. Online publication date: 1-Apr-1977.http://dx.doi.org/10.1002/qj.49710343606

207. Illingworth, A.J. Charge separation in the thunderstorms. Small scale processes// J. Geophys. Res.,1985, v. 90, p. 6026-6032.

208. Jacobson, M.Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 828 p.

209. Kamra, A.K. (1979) Effect of electrical forces on charge separation caused by the combined effect of the precipitative and convective mechanisms in thunderclouds. Journal of Geophysical Research 84:C8, 5039.http://dx.doi.org/10.1029/JC084iC08p05039

210. Kamra, A.K. (1985) Modification of some microphysical properties in the highly electrified regions of thundercloud. Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Series A 34:1, 37-50.http://dx.doi.org/10.1007/BF02267394

211. Karacostas, T., Spiridonov V., Bampzelis D., Pytharoulis I., Tegoulias I., Tymbanidis K. (2016). Analysis and numerical simulation of a real cell merger using a three-dimensional cloud resolving model // Atmospheric Research. № 169. P. 547—555.

212. Kessler, E. On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations// Meteorological Monographs, 1969. V.10, No.32. - 84 pp.

213. Khain, A., B. Lynn and J. Dudhia (2014), WRF with spectral bin microphysics: Now Part of the WRF Software Depository. The Conference of WRF users, June 2014.

214. Khain, A., Prabha T.V., Benmoshe N., Pandithurai G., Ovchinnikov M., 2013: The mechanism of first raindrops formation in deep convective clouds// Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118, 16, 9123-9140.

215. Khain, A., V. Arkhipov, M. Pinsky, Y. Feldman, and Y. Ryabov, 2004: Rain Enhancement and Fog Elimination by Seeding with Charged Droplets. Part I: Theory and Numerical Simulations. J. Appl. Meteor., 43, 1513–1529, https://doi.org/10.1175/JAM2131.1.

216. Khain, A.P., Lynn B.H. (2009), Simulation of a supercell storm in clean and dirty atmosphere using weather research and forecast model with spectral bin microphysics, J. Geophys. Res., 114. – P. 2963-2982.

217. Khvorostyanov, V.I., Curry J.F. Thermodynamics, Kinetics, and Microphysics of Clouds. Cambridge University Press, 2014 782 pages

218. Klemp, J.B., Wilhelmson R.B. The simulation of three-dimensional convective storm dynamics// J.Atmos.Sci., 1978, V.35. – P. 1070-1096.

219. Knight, C.A., Knight N.C. Hailstorms. In Severe Convective Storms, ed. C. A. Doswell. – AMS Monograph 50, 2001, ch. 6. – P. 223–254.

220. Kohn, M., E. Galanti, C. Price, K. Lagouvardos, and V. Kotroni, 2010: Now-casting thunderstorms in the Mediterranean region using lightning data. Atmos. Res., 100, 489–502.

221. Krehbiel, P.R. The electrical structure of thunderstorms// The Earth's Electrical Environment.-National Academies Press.-1986.-263 p.

222. Kuhlman, K.M., Ziegler C.L., Mansell E.R., MacGorman D.R., Straka J.M. Numerically simulated electrification and lightning of the 29 June 2000 STEPS super cell storm// Mon. Wea. Rev. – 2006. – № 134. – P. 2734–2757.

223. Kuznetsov, A. D., Solonin A.S. Hydrometeorological equipment for short range weather forecasting used in Russia (Russian State Hydrometeorological University).- http://ums.rshu.ru (дата обращения: 15.10.2017)

224. Latham, J., Mason B. J. Generation of electric charge associated with the formation of soft hail in thunderclouds// Proc. Roy. Soc. 1961. - Vol. 260.-P. 537-549.

225. Levin, Z. Y. Yin, T. Reisin and S. Tzivion: Comparison of the effects of hygroscopic and glaciogenic seeding on the evolution of the spectra of cloud

and precipitation particles in convective clouds: a numerical study. WMO 7th confer. On Weather Mod. Chiang Mai, Thailand, 73-75, 1999.

226. Levin, Z., Scott W.D. (1975) The effect of electrical conductivity on the growth of the electric field in a thunderstorm. Tellus 27:5, 497-506. http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1975.tb01703.x

227. Liu, X L, Niu S J. Numerical Simulation of Macro- and Micro-structures of Intense Convective Clouds with a Spectral Bin Microphysics Model. Adv. Atmos. Sci., 2010, 27(5) – P. 1078-1088. http://dx.doi.org/10.1029/JC080i003p00439

228. Lynn, B. H., and Y. Yair, 2010: Prediction of lightning flash density with the WRF model. Adv. Geosci., 23, 11–16.

229. Lynn, B., Khain, A.P., J. Dudhia, D. Rosenfeld, A. Pokrovsky, and A. Seifert (2005), Spectral (bin) microphysics coupled with a mesoscale model (MM5). Part 1-2, Mon. Wea. Rev. 133, 44-71.

230. MacGorman, D.R., Straka J.M., Ziegler C.L. A Lightning Parameterization for Numerical Cloud Models// American Meteorological Society, 2001,№3.- P-459.

231. Mansell, E.R., C.L. Ziegler, and E.C. Bruning, 2010: Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. J. Atmos. Sci., 67. 171-194.

232. Mansell, E.R., D.R. MacGorman, C.L. Ziegler, and Straka J.M. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model// J. Geophys. Res., 2002,107(D9), P. 40-75.

233. Mansell, E.R., MacGorman D.R., Ziegler C.L., Straka J.M. 2005. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm// J. Geophys. Res., vol. 110, D12101, doi: 10.1029/2004 JD 005287.

234. Masuelli, S., Scavuzzo C.M. and Caranti G.M. Convective electrification of clouds: A numerical study// J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102 – P. 11049–11059.

235. Mathpal, K.C., Varshneya N.C., Narsingh Dass. (1980) Precipitation-powered mechanisms of cloud electrification. Reviews of Geophysics 18:2, 361. http://dx.doi.org/10.1029/RG018i002p00361

236. Mazur, V. and Ruhnke L.H. Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning// J. Geophys. Res. – 1998. – V. 103. – P. 23299–23308.

237. Meyer, V. K., Holler H., Betz H.D. (2013) Automated thunderstorm tracking: utilization of three-dimensional lightning and radar data. Atmospheric Chemistry and Physics, 13, Seiten 5137-5150.

238. Meyers, M. P., Walko R. L., Harrington J. Y., Cotton W. R. (1997). New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme // Atmos. Research. V. 45. № 1. P. 3—29.

239. Miller, K; Gadian A; Saunders C; Latham J; Christian H (2001) Modelling and observations of thundercloud electrification and lightning, ATMOS RES, 58, pp.89-115.

240. Morrison, H, Grabowski WW (2007) Comparison of bulk and bin warm-rain microphysics models using a kinematic framework. J Atmos Sci 64(8):2839–2861

241. Muhlbauer, A., T. Hashino, L. Xue, A. Teller, U. Lohmann, R. Rasmussen, I. Geresdi, and Z. Pan (2010), Intercomparison of aerosol-cloud-precipitation interactions in stratiform orographic mixed-phase clouds, Atmos. Chem. Phys., 10, 8173–8196 .

242. Norville, K., Baker M. and Latham J. A numerical study of thunderstorm electrification: Model development and case study// J. Geophys. Res. – 1991. – V. 96, № 7. – P. 463–481.

243. Onishi, R., Takahashi, K., and Komori, S., 2008: New Bin Microphysics Scheme for Turbulent Collisions of Cloud Droplets, Proc. 22nd Computational Fluid Dynamics Symposium in Japan, P. 9–6.

244. Orville, H.D., Kopp F.J. Numerical simulation of the life history of a hailstorm. *J. Atm. Sci.* 1977. - Vol.34. - № 10. - P. 1596-1618.

245. Orville, R.D., Kopp F.J., Farley R.D., Hoffman R.B. The numerical modeling of ice-phase cloud seeding effects in a warm-based cloud: Preliminary results// J. Wea. Modif. – 1989. – V. 21. – P. 4–8.

246. Paron, P., Di Baldassarre G., Shroder J.F. (Eds.) Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters Elsevier, 2015. — 289 p.

247. Pérez Hortal, A.A., García S.E., Caranti G.M.. Droplet charging by high voltage discharges and its influence on precipitation enhancement. Atmospheric Research 108, 115-121. http://dx.doi.org/10.1016/ j.atmosres. 2012.02.006

248. Phillips, V. T. J., A. Khain, N. Benmoshe, A. Ryzhkov and E. Ilotovich, (2015), 'Theory of Time-dependent Freezing. II: Scheme for Freezing Raindrops and Simulations by a Cloud Model with Spectral Bin Microphysics, J. Atmos. Sci. 72, 262–286.

249. Pinty, J.-P., and C. Barthe, Ensemble simulation of the lightning flash variability in a 3-D cloud model with parameterizations of cloud electrification and lightning flashes, Mon. Weather Rev., 136, 380-387, 2008.

250. Pranesha, T.S., Kamra A.K. Scavenging of aerosol particles by large water drops. 2. The effect of electrical forces// J. Geoph. Res., 1997, V.102. P. 23937-23946.

251. Pratap Singh, T S Verma, N C Varshneya. (1986) Some theoretical aspects of electric field and precipitation growth in a finite thundercloud. Journal of Earth System Science 95:2, 293-298.

252. Pruppacher, H.R. and J.D. Klett, (1997) Microphysics of clouds and precipitation, 2nd Edition, Springer Netherlands, 2010. - 976 pp.

253. Qie, X., T. Zhang, G. Zhang, and T. Zhang, 2009: Electrical characteristics of thunderstorms in different plateau regions of China. Atmospheric Research, 91, 244–249.

254. Rawlins, F. A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimentional model incorporating the ice phase// Quart.Jour. of the Royal Met. Society, 1982,V.108. – P.779-801.

255. Reisin, T., Z. Levin and S. Tzivion (1996), Rain production in convective clouds as simulated in as axisymmetric model with detailed microphysics. Part II: Effects of varying drops and ice initiation, J. Atmos. Sci., 53, 1815-1837.

256. Richard, P. Severe thunderstorm nowcasting// Proc., 15th Intern. Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity. Taj Mahal, October 6-8, 1992, Atlantic City, New Jersey, USA, p. 771-779.

257. Saunders, C. P. R., H. Bax-Norman, C. Emersic, E. E. Avila, and N. E. Castellano 2006: Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 132, 2653–2673.

258. Scavuzzo, C. M., Masuelli S., Caranti G. M., Williams E. R. (1998). A numerical study of thunderstorm cloud electrification by graupel – crystal collisions // J. Geophys. Res. V. 103. № D12. P. 13963—13973.

259. Schlesinger, R.E. A three-dimensional numerical model of an isolated thunderstorm: Part I. Comparative experiments for variable ambient wind shear//J. Atmos. Sci. 1978. - Vol. 35. - № 4. - P. 690-713.124

260. Shapovalov, V.A., Shapovalov, M. A., Korchagina, E. A., Skorbezh, N. N.: 2104: Three-dimensional numerical model of deep convective cloud. 14th Conference on Atmospheric Radiation. https://ams.confex.com /ams/14CLOUD14ATRAD/webprogram /Paper248833.html (дата обращения: 15.10.2017)

261. 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

262. 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.

263. 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

264. 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

265. Simpson, J., 1976: The National Hail Research Experiment Report on the Alberta Hail Project. NCAR Technical Note , doi:10.5065/D64Q7RX8.

266. Slingerland, R., Kump L. Mathematical Modeling of Earth's Dynamical Systems: A Primer Princeton University Press, 2011. - 240 pages.

267. Smolarkiewicz, P.K., Clark T.L. Numerical Simulation of the Evolution of a Three-Dimentional Field of Cumulus Clouds. Part I: Model Description, Comparison with Observations and Sensitivity Studies// J. Atmos. Sci., 1985, V.42, № 5. – P. 502-522.

268. Spangler, J. D.,. Rosenkilde C. E. (1979) Infinite cloud model of electrification by the precipitation mechanism in the presence of high rates of ion generation. Journal of Geophysical Research 84:C6, 3184. http://dx.doi.org/10.1029/JC084iC06p03184

269. Straka, J.M. Cloud and precipitation microphysics - Principles and parameterizations. - Cambridge University Press, 2009. 407 pp.

270. Takahashi, T. (1978). Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderclouds// J. Atmos. Sci. V. 35, No. 6. P. 1536—1548.

271. Telford, J.W., Wagner P.B. (1979) Electric charge separation in severe storms. Pure and Applied Geophysics PAGEOPH 117:5, 891-903. http://dx.doi.org/10.1007/BF00876073

272. The Compilers and Tools for Scientists and Engineers. http://www.pgroup.com/lit/datasheets/pgiwsds.pdf (дата обращения: 15.10.2017)

273. Tripoli, G. J., Cotton W. R. (1982). The Colorado State University three-dimensional cloud mesoscale model. Part I. General theoretical framework and sensitivity experiments // J. de Rech. Atmos. Vol. 16. № 3. P. 185 – 250.

274. User's Guide for the NMM Core of the Weather Research and Forecast (WRF) Modeling System Version 3, 2014, 48 pp. http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/docs/user_guide/V3/users_guide_nmm_chap1-7.pdf (дата обращения: 15.10.2017)

275. Walko, R. L., Cotton W. R., Meyers M. P., Harrington J. Y. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single-moment scheme // Atmos. Research. 1995. V. 38. №1. P. 29 – 61.

276. Wang, P.K. Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation.- Cambridge University Press, 2013. — 467 p.

277. Weinheimer, A.J. The electrostatic energy of a thunderstorm and its rate of change. Journal of Geophysical Research. 1987. 92:D8, 9715.

278. Williams, E.R. The Tripole Structure of Thunderstorms// Journal of Geophysical Research, 1989, v 94,N. D11,p. 113151-13167.

279. Williams, E.R., Zhang R., Rydoc J. Mixed phase microphysics and cloud electrification. J. Atmos. Sci., 48, 2195-2203 http://dx.doi.org/10.1029/JD092iD08p09715

280. Workman, E. J. The production of thunderstorm electricity.— J. Franklin Inst., 1967, V. 283, No. 6, p. 542—557

281. Ziegler, C. L., MacGorman D. R., Dye J. E., Ray P. S. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of mountain thunderstorm// J. Geophys. Res., 1991. V. 96, № D7. - P. 833-855.

282. Ziv, A., Levin, Z, 1974: Thundercloud Electrification: Cloud Growth and Electrical Development. J. Atm.Sci. V.31. 1652-1661. http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<1652:TECGAE>2.0.CO;2 (дата обращения: 15.10.2017)

ПРИЛОЖЕНИЕ А
СВЕДЕНИЯ О ПРАКТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
по науке АО "НПО "ЛЭМЗ"
Главный инженер ОКБ
_____ к.т.н. В.С. Ефремов
«_13_» _02_____2016г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Шаповалова Виталия Александровича на тему «Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов» в ОКР и серийные изделия «ДМРЛ-С».

Комиссия в составе:

Председателя: главного конструктора по направлению ОКБ АО «НПО «ЛЭМЗ» к.ф.-м.н. И.С. Вылегжанина

и **членов комиссии**: начальника 13-го отдела ОКБ АО «НПО «ЛЭМЗ» Б.М. Вовшина,

начальника бюро 33 сектора ОКБ АО «НПО «ЛЭМЗ» А.Н. Корнеева,

составила настоящий Акт о нижеследующем.

Результаты диссертационной работы В.А. Шаповалова внедрены АО «Научно-производственное объединение «Лианозовский электро-механический завод» в опытный образец изделия «ДМРЛ-С», прошедший Государственные испытания, созданный в рамках Федеральных целевых правительственных программ «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ на 2008-2015гг.» и «Модернизация ЕС ОРВД РФ». Материалы диссертации внедрены в части:

1. Вторичной обработки информации (ВОИ) «ГИМЕТ-2010», которое обеспечивает прием, анализ и отображение в реальном масштабе времени радиолокационной метеорологической информации доплеровских радиолокаторов «ДМРЛ-С».
2. Алгоритмов прогноза развития опасных конвективных процессов, применяемых в экспертных системах штормового оповещения.
3. Алгоритмов распознавания опасных метеоявлений и их визуализация на рабочем месте оператора «ДМРЛ-С».

Результаты диссертации реализованы в созданном соискателем программном обеспечении системы вторичной обработки информации «ДМРЛ-С» и внедрены в серийное производство.

Председатель комиссии:
Главный конструктор по направлению _____ И.С. Вылегжанин
ОКБ АО «НПО «ЛЭМЗ» «18» 02 2016г.

Члены комиссии:
Начальник 13-го отдела _____ Б.М. Вовшин
ОКБ АО «НПО «ЛЭМЗ» «18» 02 2016г.

Начальник бюро 33 сектора _____ А.Н. Корнеев
ОКБ АО «НПО «ЛЭМЗ» «18» 02 2016г.



«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ФГБУ «ВГИ»
_____М.Ю.Беккиев
«06» марта 2016г.

АКТ

о внедрении результатов диссертации Шаповалова Виталия Александровича «Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.30 - Метеорология, климатология, агрометеорология

Результаты диссертационной работы В.А. Шаповалова используются в научной работе в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Высокогорный геофизический институт» в отделах: физики облаков, активных воздействий, стихийных явлений. Также материалы диссертации используются в учебном процессе в аспирантуре ФГБУ «ВГИ» по специальности 25.00.30.

Трехмерная нестационарная модель конвективного облака обеспечивает проведение расчетов полей температуры, восходящих потоков, водности, фазовой структуры и размеров частиц осадков, формирующихся при естественном развитии облака и при засеве искусственными кристаллами. На основе численного моделирования на основе трехмерной модели в отделе физики облаков проводятся исследования взаимодействия микрофизических, термодинамических и электрических процессов.

Для интерпретации результатов расчетов и данных наблюдений применяется разработанное В.А.Шаповаловым, адаптированное для задач физики облаков и АВ на них, программное обеспечение трехмерной визуализации метеорологической информации.

Программные средства для приема, архивации и отображения данных метеорологических радиолокаторов и систем грозопеленгации, анализа объединенной информации используются в отделах физики облаков, стихийных явлений для разработки методов штормового оповещения, идентификации опасных явлений погоды.

В ФГБУ «ВГИ» применяется разработанное В.А.Шаповаловым программное обеспечение «ГИМЕТ-2010» для обработки и отображения информации метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С, которыми оснащается современная радиолокационная сеть Российской Федерации.

Материалы исследований широко использовались при выполнении ФГБУ «ВГИ» целевых научно-технических программ Росгидромета (ЦНТП Плана НИОКР на 2008-2010 гг, 2011-2013 гг, 2014-2016 гг), Федеральных

целевых программ «Геофизика» 2008-2015 гг., «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009-2013 гг.

В рамках аспирантуры ФГБУ «ВГИ» применяются следующие материалы диссертации В.А.Шаповалова:

- Система уравнений трехмерной численной модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов, граничные условия, начальные условия.
- Методы дискретного представления задачи и численного решения. Методы расщепления по физическим процессам, метод прогонки решения систем линейных алгебраических уравнений.
- Полученные в диссертации закономерности формирования макро- и микроструктурных, и электрических характеристик конвективных облаков.

Материалы исследований В.А.Шаповалова использовались при подготовке научных статей и монографий специалистами отдела, в том числе:

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

Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Кулиев Д.Д., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития// Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 11-12. С. 900-907.

Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Езаова А.Г., Продан К.А. Моделирование спектров частиц в конвективных облаках со смешанным фазовым составом и их радиационных свойств// Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 5 (55). С. 63-72.

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

Куповых Г.В., Ашабоков Б.А., Бейтуганов М.Н., Шаповалов А.В., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков// Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2012. № 6 (172). С. 65-68.

Зав. отделом физики облаков
д.ф.м.н., профессор Б.А.Ашабоков

Зав. отделом стихийных явлений
д.ф.м.н., профессор А.Х.Аджиев

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель начальника
Военно-космической академии
имени А.Ф.Можайского
по учебной и научной работе
доктор технических наук, профессор

Ю. Кулешов

«22» июня 2016 года

АКТ

о внедрении результатов диссертационных исследований
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
Шаповалова Виталия Александровича
в учебный процесс Военно-космической академии
имени А.Ф.Можайского

Комиссия в составе: председателя комиссии – начальника кафедры № 52 Технологий и средств геофизического обеспечения доктора технических наук Готюра И.А.; членов комиссии – профессора 52 кафедры доктора технических наук профессора Доронина А.П., доцента 52 кафедры кандидата технических наук доцента Петроченко В.М. установила, что основные научные результаты диссертационной работы Шаповалова Виталия Александровича внедрены в учебный процесс академии на кафедре № 52 Технологий и средств геофизического обеспечения:

а) по дисциплине «Физика атмосферы, океана и вод суши» по специальности «Метеорология специального назначения», а именно:

– в тексты лекций по теме №15 «Физические условия образования и классификация облаков. Конвективные облака» (2 часа) включены закономерности формирования макро- и микроструктурных характеристик мощных конвективных облаков;

б) по дисциплине «Воздействия на атмосферные процессы и явления» по специальности «Метеорология специального назначения», а именно:

– в тексты лекций по теме №3 «Физические основы и методы воздействия на конвективные облака» (4 часа) включены:

- результаты моделирования засева облаков теплого периода с целью искусственного увеличения осадков и предложения по совершенствованию технологии;

- результаты оценки эффекта активных воздействий на градовые облака кристаллизующим реагентом и рекомендации по усовершенствованию технологии воздействия;

в) по дисциплине «Технические средства гидрометеорологической службы» по специальности «Метеорология специального назначения», а именно:

– в тексты лекций по теме №2 «Метеорологические радиолокаторы» (4 часа) и теме №4 «Радиопеленгаторы-дальномеры гроз» (4 часа) включены программные средства для приема, архивации и отображения данных метеорологических радиолокаторов и систем грозопеленгации, комплексного анализа информации с целью идентификации опасных явлений погоды;

г) по дисциплине «Синоптическая метеорология» по специальности «Метеорология специального назначения», а именно:

– в тексты лекций по теме №15 «Прогнозирование метеорологических величин и явлений погоды» (4 часа) включена методика текущего прогноза перемещения опасных явлений погоды.

Результаты внедрения диссертационных исследований в учебный процесс академии рассмотрены и обсуждены на заседании кафедры № 52 Технологий и средств геофизического обеспечения Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского (протокол № 15 от 15 июня 2016 г.).

Председатель комиссии:
доктор технических наук И.Готюр

Члены комиссии:
доктор технических наук, профессор А.Доронин

кандидат технических наук, доцент В.Петроченко

«УТВЕРЖДАЮ»
Начальник ФГБУ «СКВС»
_____Х.Х.Чочаев
«04» 03 2016 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Шаповалова Виталия Александровича «Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов», на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25,00.30 - метеорология, климатология, агрометеорология

Настоящий Акт составлен о том что в Северо-Кавказской военизированной службе по активному воздействию на гидрометеорологические и другие процессы используются научные и практические результаты докторской диссертации В.А.Шаповалова. В частности, используются результаты теоретических исследований автора, выполненных по трехмерной модели конвективного облака с учетом электрических процессов, и программы для анализа и отображения радиолокационных и грозопеленгационных данных.

На командно-диспетчерских пунктах СКВС используется программа трехмерной графики автора, которая позволяет визуализировать объемные облака над подстилающей поверхностью с географической информацией. Программное обеспечение позволяет выделять градоопасные облака на ранней стадии развития и экономить средства воздействия.

В учебно-методическом процессе используются полученные диссертантом данные по трехмерной структуре грозоградовых облаков, по объемному электрическому заряду и напряженности поля. С учетом последних в СКВС разработан метод воздействия на электрическое состояние конвективных облаков и на град.

В оперативном центре СКВС используется программа автора для анализа и отображения информации доплеровских радиолокаторов ДМРЛ-С

Начальник отдела активных воздействий,
доктор физ.-мат. наук _____М.Н.Бейтуганов

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
ФГБУ "НИЦ "Планета"
д.ф.-м.н. _____ Стасенко В.Н.
«05» ____04____ 2016 г.

АКТ

внедрения научных и практических результатов диссертационного исследования В.А. Шаповалова на тему «Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов»

Автором диссертации в качестве составной части исследования разработано автоматизированное рабочее место комплексного анализа региональной радиолокационной, грозопеленгационной и спутниковой информации.

Комплект программного обеспечения АРМ установлен на рабочей станции в Оперативном геофизическом центре Росгидромета, созданном в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (ФГБУ «НИЦ «Планета)», и используется для визуализации данных Центра мониторинга геофизической обстановки в южном регионе РФ (г. Нальчик). В частности, данные региональной грозопеленгационной сети Южного и Северо - Кавказского федеральных округов, объединенные с радиолокационной и спутниковой информацией об облаках и осадках в регионе, интегрируются в объединенную карту данных с комплекта аналогичной грозопеленгационной системы «LS8000», установленной в Московском регионе.

Программное обеспечение АРМ использовано при выполнении ОКР по Федеральной целевой программе «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации на 2008- 2015 годы».

В научно-техническом отчете по указанной ФЦП использованы следующие разделы диссертационного исследования Шаповалова В.А.:

- программные средства приема, архивации и отображения данных региональной сети метеорологических радиолокаторов и системы грозопеленгации, а также комплексного анализа информации с целью идентификации опасных явлений погоды;
- методика текущего прогноза перемещения опасных явлений погоды.

Заведующий отделом 13.2
к.г.н. И.Ф. Берестовский

УТВЕРЖДАЮ
проректор ФГБОУ ВО
«Кабардино-Балкарский
государственный университет
им. Х.М. Бербекова»
по НИР и МС, доктор физико-
математических наук, профессор
_____ А.П. Савинцев
«04» 03 2016 г.

АКТ

внедрения результатов докторской диссертации Виталия Александровича Шаповалова «Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов»

В Кабардино-Балкарском государственном университете им. Х.М. Бербекова, на кафедре геофизики и экологии в учебном процессе, а также при выполнении выпускных квалификационных работ, магистерских диссертаций студентами используются, научно-практические результаты диссертационного исследования В.А. Шаповалова в виде:

- Постановки задачи и записи системы уравнений численной модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов.
- При формулировке граничных и начальных условий.
- Методов дискретного представления задачи в пространственно-временной области, аппроксимации дифференциальных операторов конечно-разностными выражениями.
- Закономерностей формирования макро- и микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков, полученных автором в диссертации.
- Используется программное обеспечение анализа и отображения радиолокационной метеорологической информации.

Также, в учебном процессе используются полученные автором диссертации данные по трехмерной структуре грозоградовых облаков.

к. ф.-м. наук, доцент кафедры Г и Э С.Б. Балкарова

И.о. директора института
физики и математики Р.Ш. Жемухов

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор института математики и естественных наук
ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет»
проф. Агибова И.М.
«17» мая 2016 г.

Акт

о внедрении результатов докторской диссертации
Шаповалова Виталия Александровича
«Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов»

Результаты диссертационной работы В.А. Шаповалова используются в учебном процессе в Северо-Кавказском Федеральном университете на кафедре общей и теоретической физики по направлениям подготовки: 05.06.01 – Науки о Земле, профиль «Физика атмосферы и гидросферы», 03.04.02 – Физика, профиль подготовки «Физика атмосферы и околоземного космического пространства».

Результаты диссертации используются:

– при преподавании дисциплин: «Физика атмосферы и гидросферы», «Физика облаков», «Физика тепловой конвекции в атмосфере», «Активные воздействия на гидрометеорологические процессы»;

– в дипломном проектировании, в научно-исследовательских работах, выполняемых по этим направлениям подготовки.

При подготовке аспирантов применяются следующие материалы диссертации В.А. Шаповалова:

- уравнения трехмерной численной модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов;
- методы дискретного представления задачи и численного решения систем дифференциальных уравнений. Метод расщепления по физическим процессам;
- закономерности формирования макро- и микроструктурных характеристик мощных конвективных облаков;
- исследование системных свойств объектов, в частности, взаимодействия различных процессов в облаках.

Зав. кафедрой общей и теоретической физики,
д.ф.-м.н., профессор Ю.И. Диканский

Профессор кафедры общей и теоретической физики,
д.ф.-м.н., доцент Р.Г. Закинян



УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
по научной работе
_____Иванов Т.Х.
«04» марта 2016 г.

АКТ

об использовании результатов докторской диссертации Шаповалова В.А. «Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов».

Для исследования образования и развития опасных конвективных процессов в атмосфере и разработки методов снижения рисков, связанных с этими явлениями, в отделе математических методов исследования сложных систем и процессов института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН используются разработанные в диссертационной работе Шаповалова В.А. «Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов» трехмерная нестационарная модель мощных конвективных облаков, численный алгоритм и программные средства ее реализации на ЭВМ.

Результаты численных экспериментов по исследованию образования и развития мощных конвективных облаков, полученные с помощью данной модели, вошли в заключительный отчет по теме «Моделирование долгосрочного развития региональных социально – экономических систем с учетом экономических, социальных, демографических и экологических процессов», выполненной в 2013-2015гг.

Старший научный сотрудник отдела
«Математические методы исследования
сложных систем и процессов» КБНЦ РАН
к.ф.- м.н. Б.К. Буздов



"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор РГГМУ

_____Крылов А.Г.

«20» 03 2016г.

АКТ

о внедрении научных и практических результатов диссертации В.А.Шаповалова «Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов»

Результаты диссертационной работы В.А. Шаповалова используются в учебном процессе в Российском государственном гидрометеорологическом университете на кафедре «Метеорологии, климатологии и охраны атмосферы» по направлению подготовки 05.03.05 – «Прикладная гидрометеорология»:

- для обучения студентов в рамках бакалавриата и магистратуры по дисциплине: «Прикладная гидрометеорология»;
- в дипломном проектировании;
- в научно-исследовательских работах, выполняемых по этим направлениям подготовки.

В рамках дисциплин " Атмосферное электричество", «Спец. главы физики атмосферы, океана и вод суши», «Моделирование облаков», «Электричество облаков», «Физика облаков» в РГГМУ применяются материалы диссертационной работы В.А.Шаповалова:

- Уравнения трехмерной численной модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов.
- Методы дискретного представления модели;

- Закономерности формирования электрической структуры мощных конвективных облаков.

- Исследование системных свойств объектов, в частности, взаимодействия различных процессов в облаках.

В учебном процессе используются материалы публикаций с участием В.А.Шаповалова:

- Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Кулиев Д.Д., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития// Известия Вузов. Радиофизика. - Т. 56.- № 11-12.- 2013. - С. 900-907

- Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Трехмерная визуализация геофизической информации для решения прикладных задач// Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 1. С. 65-71.

И.о. зав. кафедрой МКОА, к.г.н.

_____ Александров В.Я.

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ФГБУ «Краснодарская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы»
352510 г. Лабинск, ул. Армавирское шоссе, 12/2. ИНН 2314004708. Тлф 6-03-52
л/сч 06169717730 в УФК по Краснодарскому краю

Справка

№ 101 от 31.05.2016г.

О внедрении результатов диссертации В.А.Шаповалова «Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.30 – Метеорогогия, климатология, агрометеорология

Данные исследований грозовой деятельности в мощных конвективных облаках на территории Северного Кавказа, полученные в диссертации В.А.Шаповалова, рекомендованы для изучения при подготовке руководителей активного воздействия на градовые облака в Краснодарской военизированной службы.

Программные средства для приема, архивации и отображения данных метеорологических радиолокаторов и систем грозопеленгации, анализа объединенной информации, используются на командно-диспетчерских пунктах службы для определения объектов воздействия.

Программа 3-х мерного представления радиолокационных данных автора диссертации применяется операторами службы для анализа структуры градовых ячеек, выделения восходящих потоков и смерчеопасных областей.

Начальник Краснодарской ВС П.Е.Вавилов

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЕГИСТРАЦИОННОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО НА ОБЪЕКТ УЧЕТА

Программное обеспечение вторичной обработки информации управляющего вычислительного комплекса доплеровского метеорологического радиолокатора (ПО ВОИ УВК-ДМРЛ-С) "ГИМЕТ-2010"

созданного при выполнении государственного контракта:
Разработка программного обеспечения вторичной обработки информации управляющего вычислительного комплекса доплеровского метеорологического радиолокатора (ПО ВОИ УВК-ДМРЛ-С) "ГИМЕТ-2010"
Сроки проведения работы с 20.09.2008 по 15.12.2010

Номер реестровой записи в Реестре государственных контрактов
0016908000039 от 31 октября 2008 г.

Заказчик: ***Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды***

Исполнитель: ***ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»***

на основании заявки на регистрацию объекта учета от 03 октября 2011 г. и проведения процедуры учета

Указанному объекту учета ***12 октября 2011 г.*** **присвоен**
регистрационный номер 13251.0711017410.11.1.001/001

Директор Департамента государственной научно-технической политики и инноваций **А.В. Наумов**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013618333

"ГИМЕТ-2010" - ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДОПЛЕРОВСКОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА ДМРЛ-СМ

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт» (RU)***

Авторы: ***Шаповалов Александр Васильевич (RU), Шаповалов Виталий Александрович (RU), Стасенко Валерий Никифорович (RU)***

Заявка № **2013616448**

Дата поступления **23 июля 2013 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***06 сентября 2013 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017617322

Программа численного моделирования распространения примесей в атмосфере с учетом метеорологических условий «МЗД-ДИФФ»

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт» (RU)***

Авторы: ***Шаповалов Александр Васильевич (RU), Шаповалов Виталий Александрович (RU), Рязанов Валерий Игоревич (RU)***

Заявка № **2017614276**
Дата поступления **10 мая 2017 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***04 июля 2017 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017617324

Программа для приёма, анализа и отображения радиолокационной метеорологической информации радиолокаторов МРЛ-5 противоградовых служб и метеообеспечения авиации «МЕРКОМ-2017»

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт» (RU)***

Авторы: ***Шаповалов Александр Васильевич (RU), Шаповалов Виталий Александрович (RU), Капитанников Александр Владимирович (RU), Атабиев Залим Махтиевич (RU)***

Заявка № **2017614275**
Дата поступления **10 мая 2017 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***04 июля 2017 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018616720

Программа приема, обработки и представления радиолокационной, грозорегистрационной и метеорологической информации «АПК-07-ВГИ»

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт» (RU)***

Авторы: ***Шаповалов Виталий Александрович (RU),***
Шаповалов Максим Александрович (RU)

Заявка № **2018613715**
Дата поступления **16 апреля 2018 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***06 июня 2018 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018616759

Программа для сбора и передачи на центральный сервер радиолокационной информации с метеорадиолокаторов служб «АПК-11-ВГИ»

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт» (RU)***

Авторы: ***Шаповалов Виталий Александрович (RU),***
Шаповалов Александр Васильевич (RU)

Заявка № **2018613716**
Дата поступления **16 апреля 2018 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***06 июня 2018 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018616721

Программа для численного моделирования конвективных процессов в атмосфере «АПК-12-ВГИ»

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт» (RU)***

Авторы: ***Шаповалов Виталий Александрович (RU),***
Шаповалов Александр Васильевич (RU)



Заявка № **2018613712**
Дата поступления **16 апреля 2018 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***06 июня 2018 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДОППЛЕРОВСКОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА ДМРЛ-С «ГИМЕТ-2010»

1 Программа «ГИМЕТ-2010»

Главное меню программы “ГИМЕТ-2010” в оперативном режиме работы представлено на рисунке 1:



Рисунок 1 - *Главное меню* программы вторичной обработки в оперативном режиме работы (краткое меню)



Рисунок 2 - *Главное меню* программы вторичной обработки в оперативном режиме работы (расширенное меню)

Главное меню служит для настойки и выбора отображаемой информации, изменения масштаба изображения, задания режима документирования и т.д.

Главное меню содержит следующие пункты:

«Программа»

Пункты меню «Программа» (рисунок.3) позволяют либо свернуть окно, либо завершить работу программы.

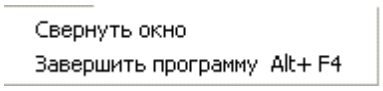


Рисунок 3- Меню «Программа»

«Карты»

С помощью меню «Карты» (рисунок 4) можно получить информацию о явлениях:

«Все метеоявления»: позволяет вывести двумерную карту всех явлений в области опасных явлений, для вызова можно использовать функциональную клавишу Alt+;.

«Опасные метеоявления»: позволяет вывести двумерную карту всех явлений в области отображения, для вызова можно использовать функциональную клавишу Alt+L (рисунок 5).

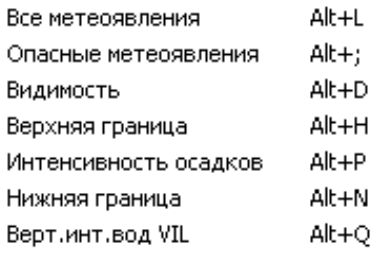


Рисунок 4 - Меню «Карты»

«Видимость»: позволяет вывести двумерную карту видимости, для вызова можно использовать функциональную клавишу Alt+D. (рисунок.6)

«Верхняя граница»: позволяет вывести двумерную карту верхней границы облаков, для вызова можно использовать функциональную клавишу Alt+H. (рисунок 7)

«Интенсивность осадков»: позволяет вывести двумерную карту интенсивности осадков (функциональная клавиша Alt+P), которая рассчитывается из соотношения Z=aIb, где Z – отражаемость на уровне 0,5 - 1 км, I – интенсивность осадков мм/ч, a и b – коэффициенты. (рисунок 8)

«Нижняя граница»: позволяет вывести двумерную карту нижней границы облаков для вызова можно использовать функциональную клавишу Alt+N. (рисунок.9)

«Верт.инт.вод. VIL»: позволяет вывести двумерную карту водности, для вызова можно использовать функциональную клавишу Alt+Q. (рисунок 10).

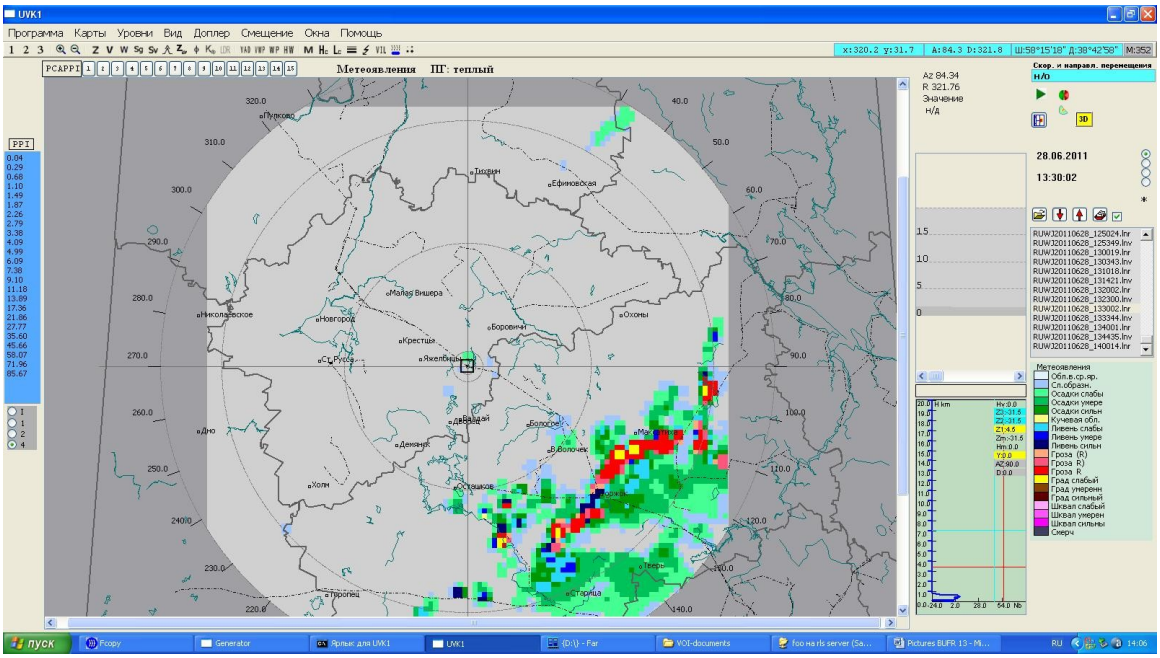


Рисунок 5 - *«Опасные явления»* и *«Все явления»* - карта всех наблюдаемых явлений

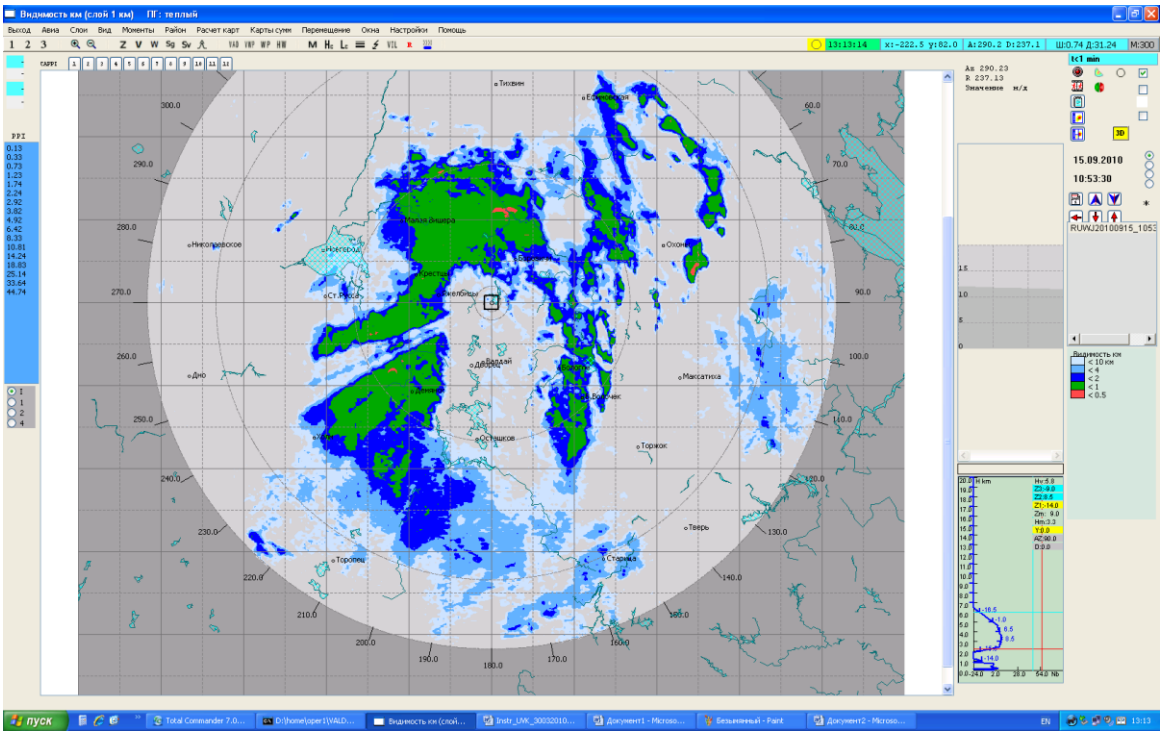


Рисунок 6 - *«Видимость»* - отображение пределов видимости в данной зоне осадков

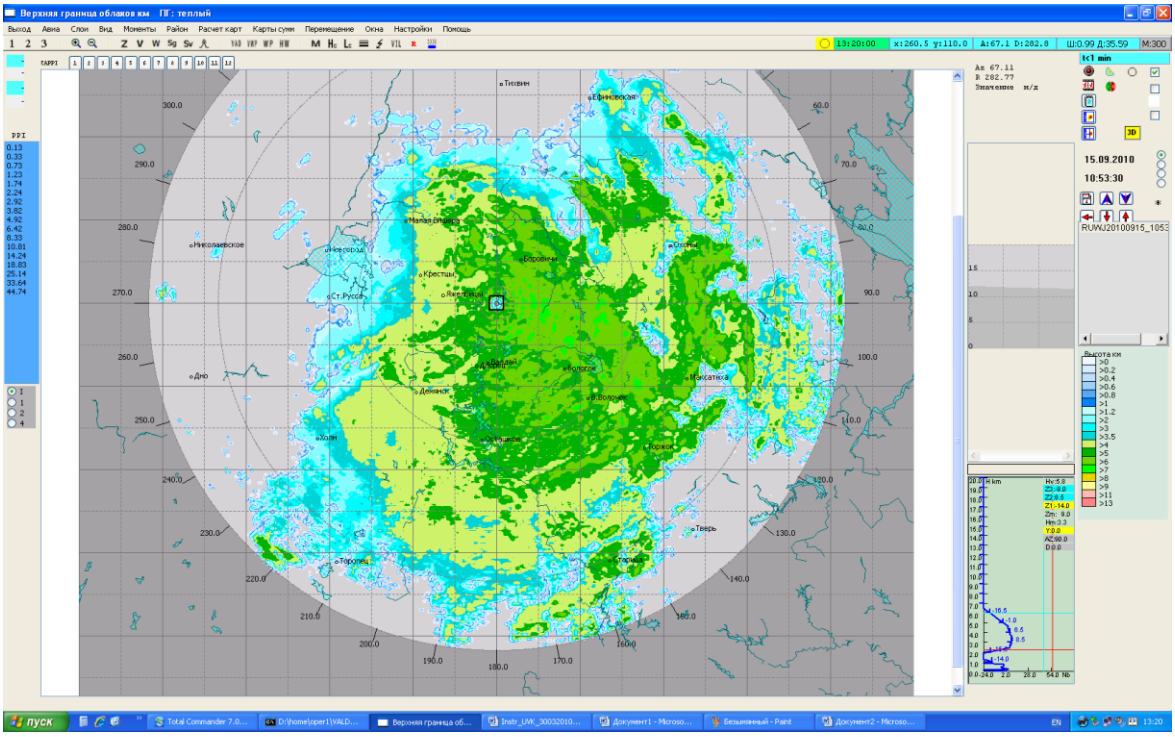


Рисунок 7 - *«Верхняя граница»* - отображение верхней границы облачности

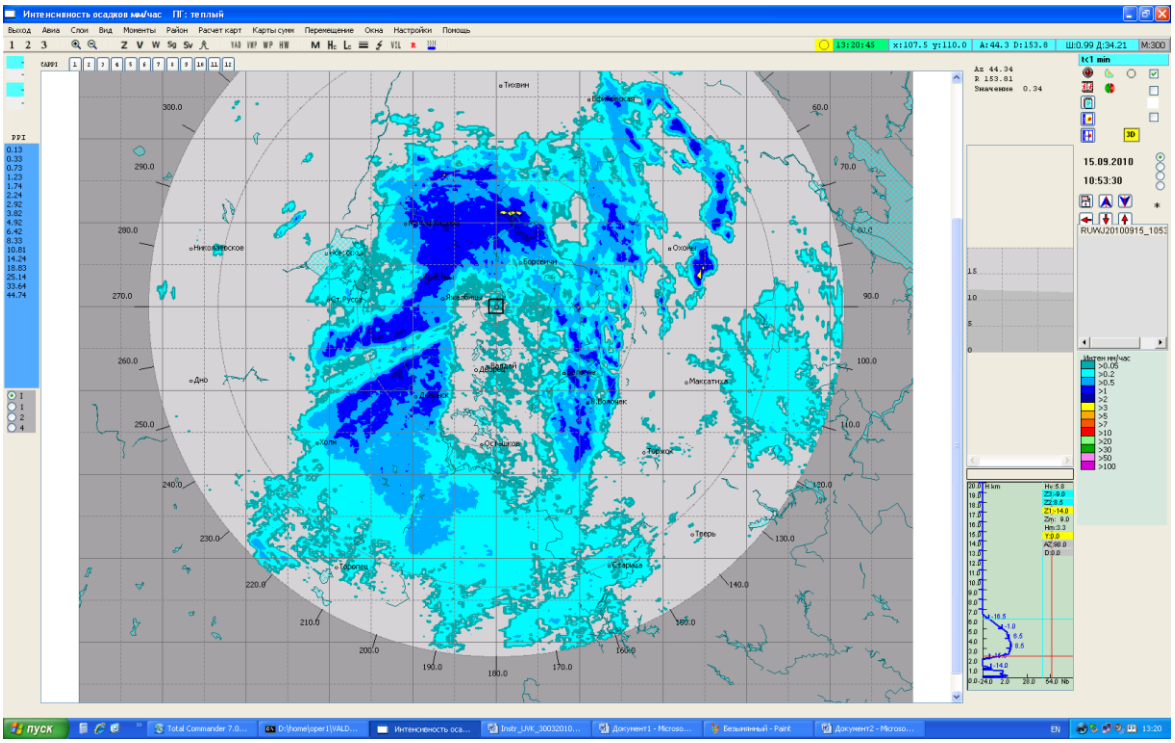


Рисунок 8 - *«Интенсивность осадков»* - карта интенсивности осадков в мм/час

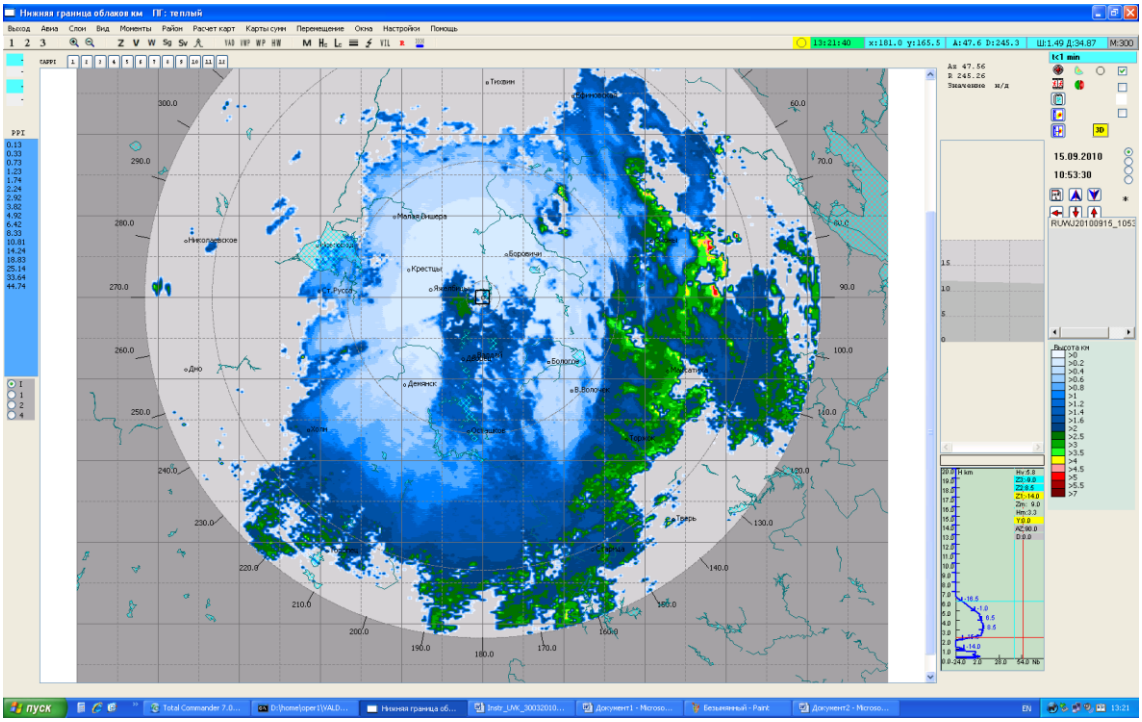


Рисунок 9 - *«Нижняя граница»* - отображение нижней границы облачности

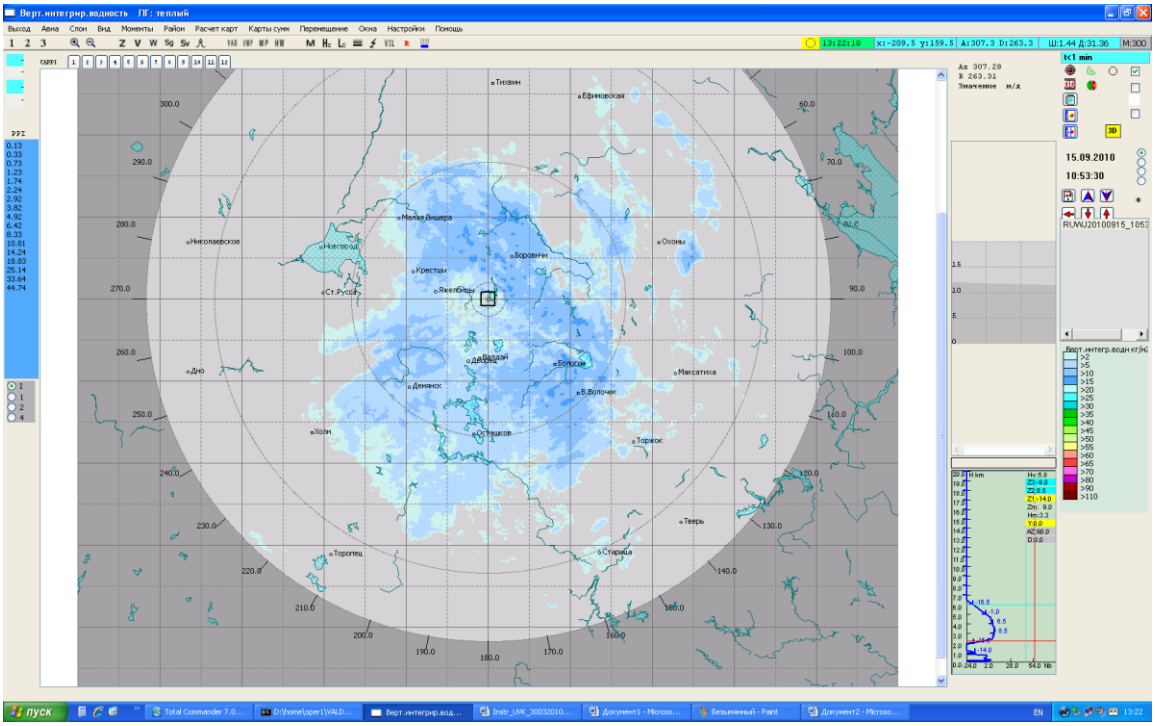


Рисунок 10 - Карта вертикально интегрированной водности (VIL).

«*Верт. интегр. водность*» - суммарное содержание воды в вертикальном столбе пространства, обнаруживаемое радиолокатором.

С помощью меню «Уровни» (рисунок 11) производится выбор типа информации горизонтальных сечений на уровнях:

«Z1» - карта отражаемости в слое 1км;

«Z2» - отображение горизонтального сечения отражаемости на уровне нулевой изотермы;

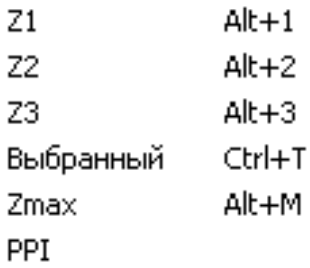


Рисунок 11 - Меню «Уровни».

«Z3» - отображение горизонтального сечения отражаемости на уровне 0^0C + 2,5 км (выбирается в меню «Настройки/Цвета отображения/Режим/Приращение deltaH»);

«Выбранный» - отражаемость на выбранном уровне;

«Zmax» - максимальная отражаемость;

«PPI» - конусное сечение обзора.

После выбора одного из пунктов подменю, в соответствии с выбранным типом, происходит обновление отображаемой информации.

Меню «Доплер» предназначено для вывода карт продуктов, в том числе доплеровских (рисунок 12).

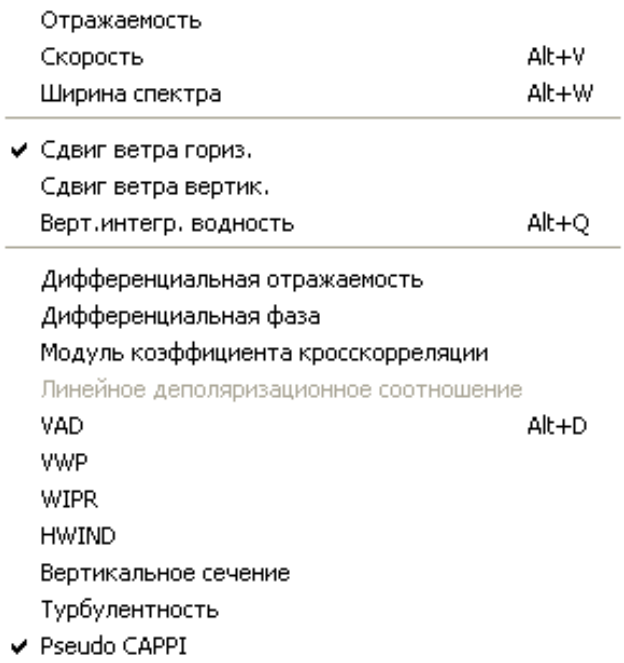


Рисунок 12 - Меню «Доплер».

При помощи данного меню можно построить карты:

- отражаемости (рисунок 13);
- радиальных скоростей (рисунок 14);
- ширины спектра (рисунок 15);
- сдвигов ветра (гориз. и вертик.) (рисунки 16-17);
- вертикальной интегральной водности;
- дифференциальной отражаемости (рисунок 18);
- дифференциальной фазы (рисунок 19);
- модуля коэффициента кросскорреляции (рисунок 20);
- линейного деполяризационного отношения (при излучении только горизонтальной поляризации) (рисунок 21).

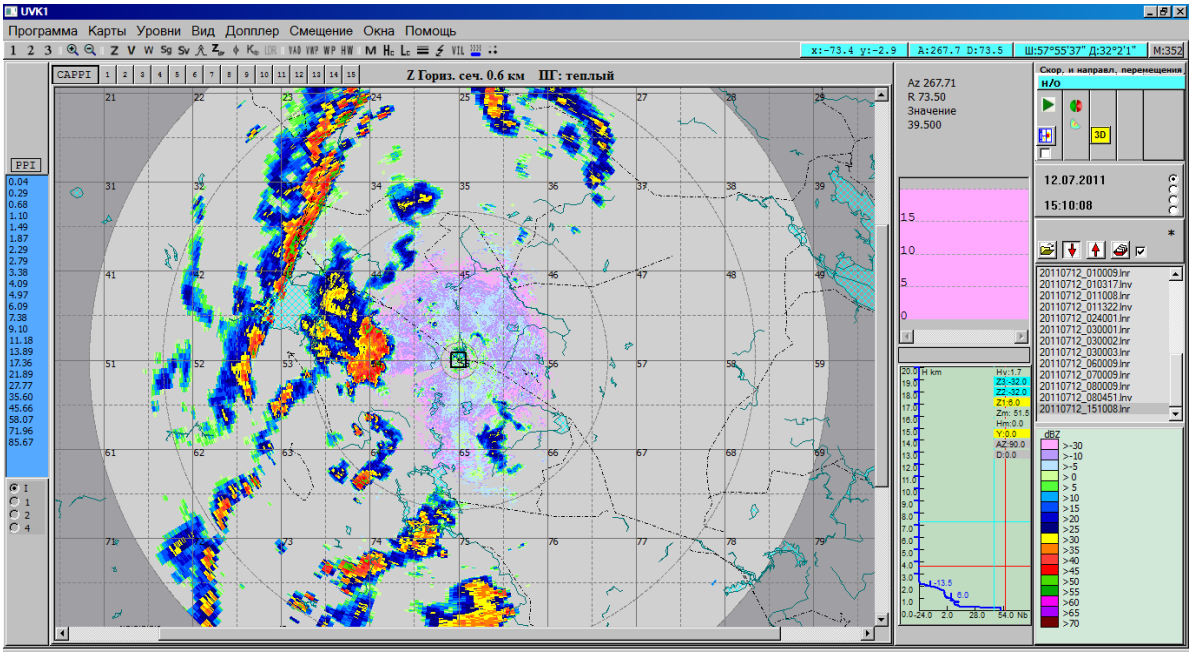


Рисунок 13 - Карта радиолокационной отражаемости.

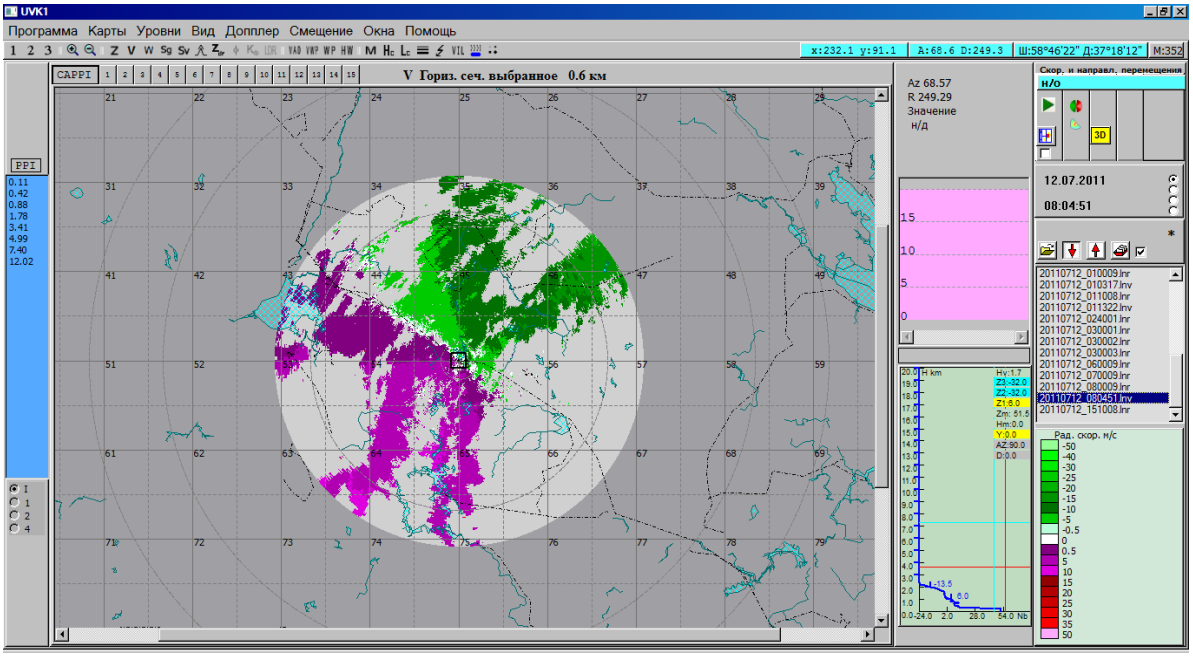


Рисунок 14 - Карта допплеровской радиальной скорости.

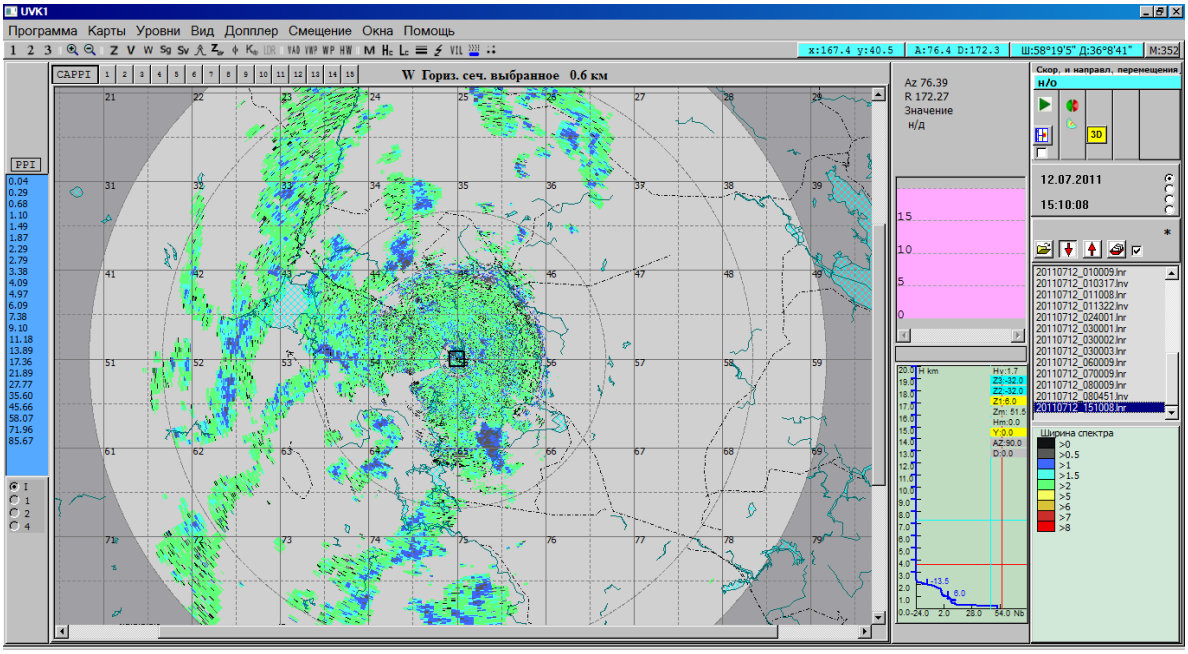


Рисунок 15 - Карта ширины спектра.

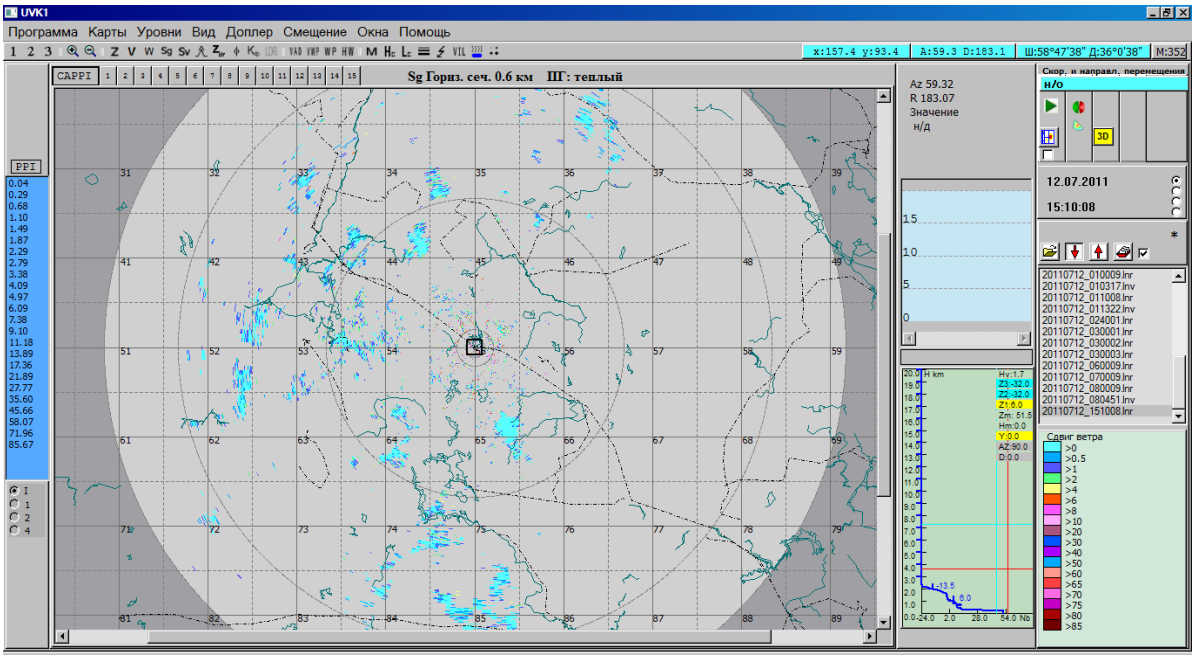


Рисунок 16 - Карта горизонтального сдвига ветра.

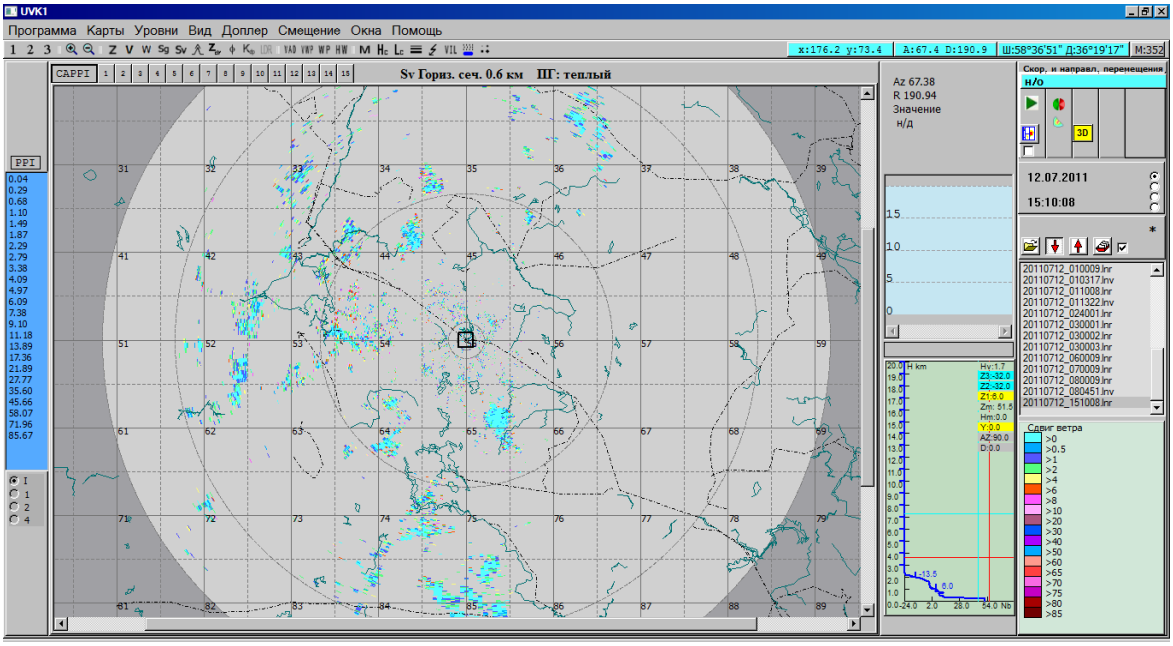


Рисунок 17 - Карта вертикального сдвига ветра.

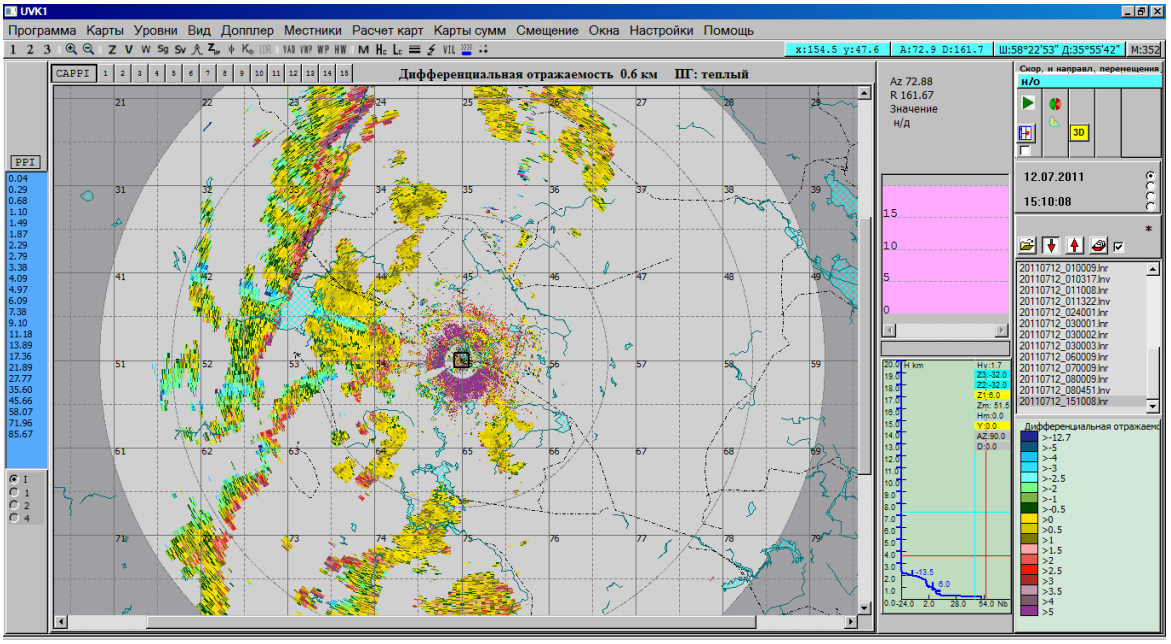


Рисунок 18 - Карта дифференциальной отражаемости.

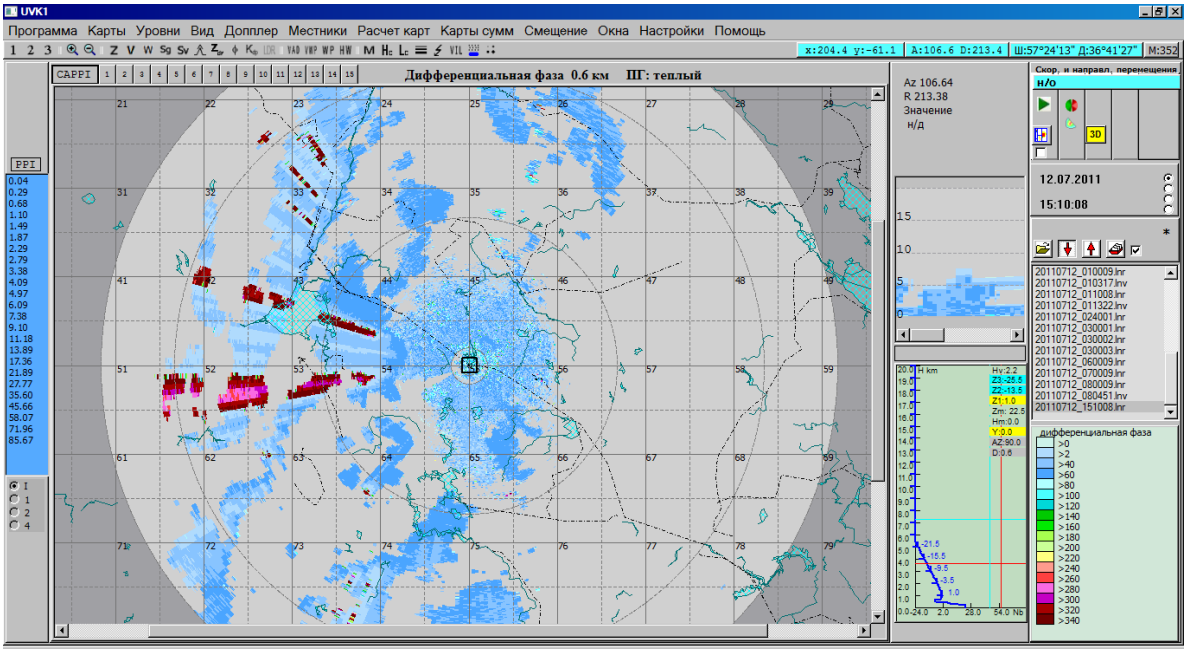


Рисунок 19 - Карта дифференциальной фазы.

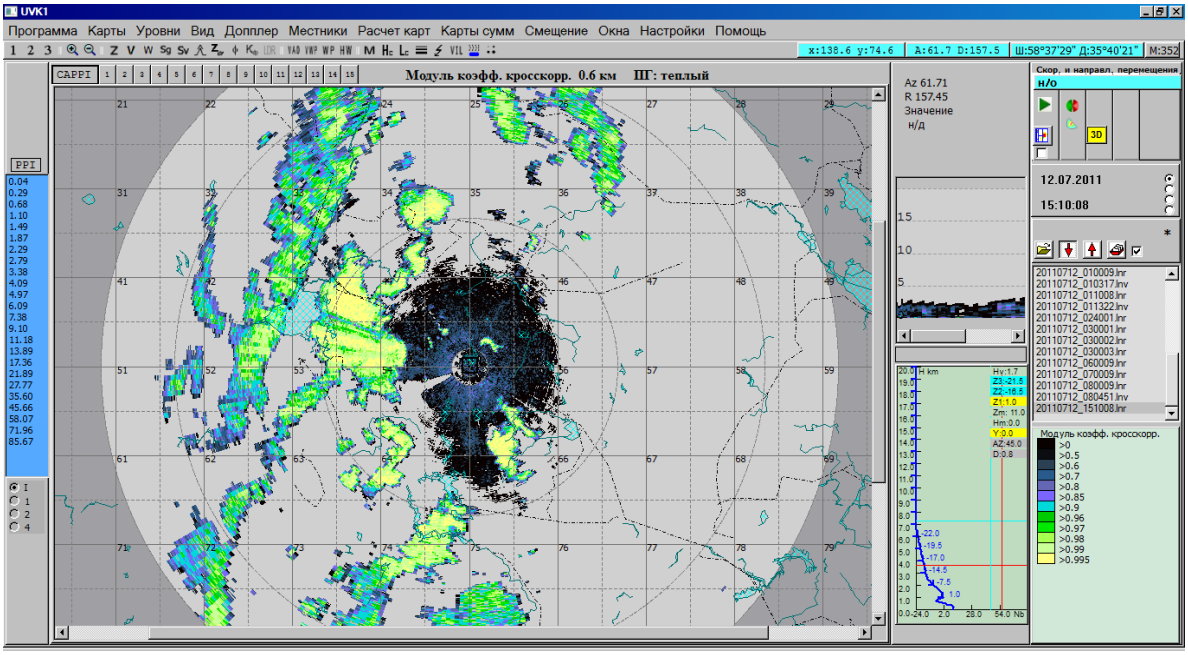


Рисунок 20 - Карта модуля коэффициента кросскорреляции.

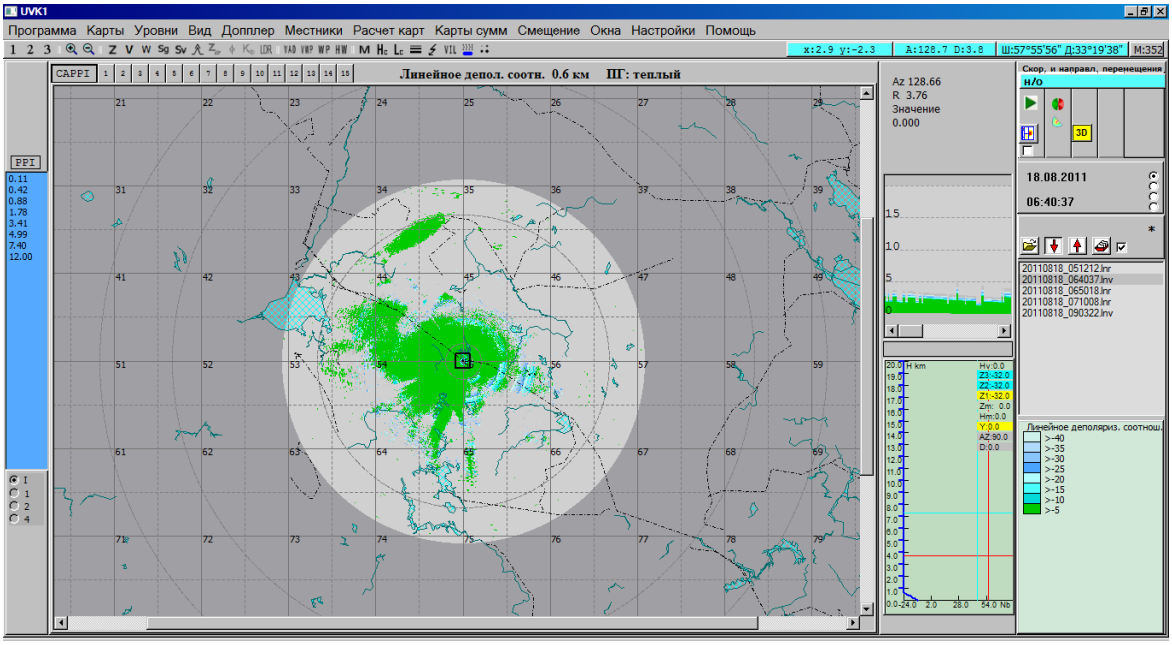


Рисунок. 21 - Карта линейного деполяризационного отношения.

Кроме того, выводятся следующие данные:

- *«VAD»* - отображает дисплей азимутальной скорости (рисунок 22);

- *«WIPR»* - отображает вертикальный профиль ветра (рисунок 23);

- *«VWP»* - отображает профиль ветра со временем по режимам «скорость» (рисунок 24);

- *«HWIND»* - отображает горизонтальный ветер (рисунок 25);

- вертикальное сечение первичных данных;

- карта турбулентности (рисунок 26);

- карты pseudo-cappi.

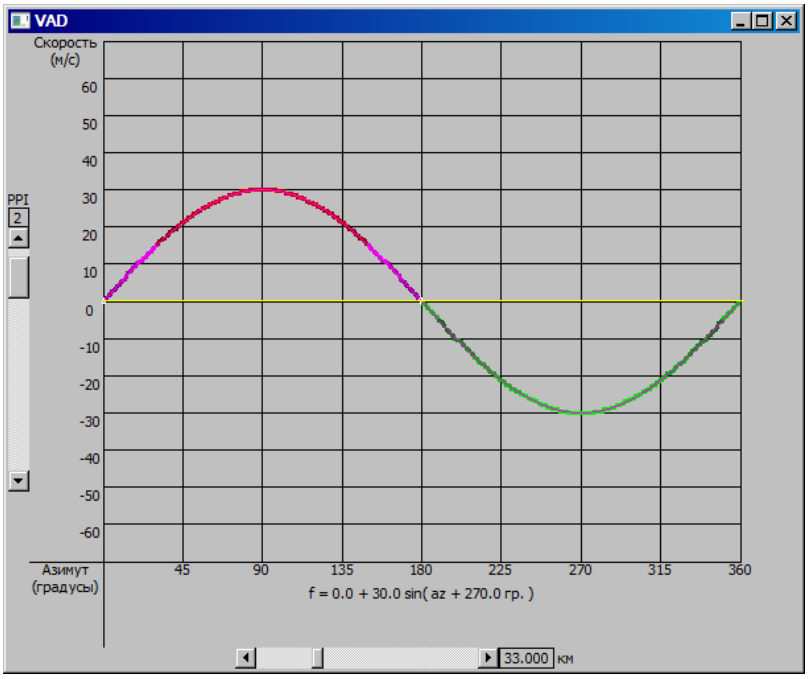


Рисунок 22 - Дисплей азимутальной скорости (VAD).

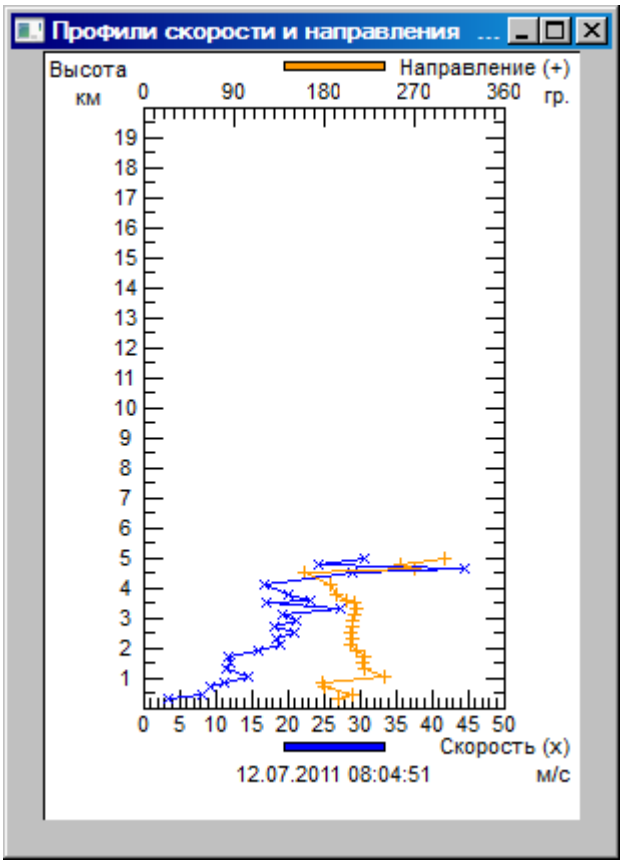


Рисунок 23 – График вертикального изменения скорости и направления ветра.

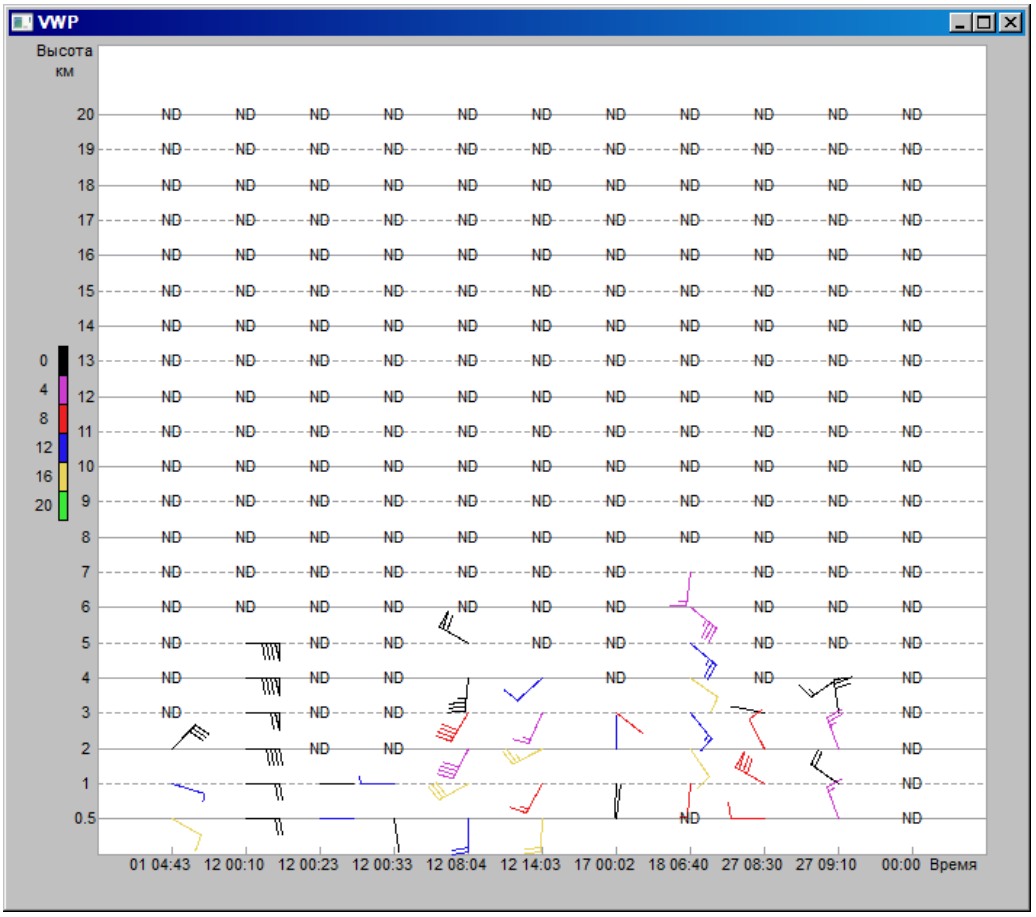


Рисунок 24 – Дисплей изменения со временем профиля ветра (VWP).

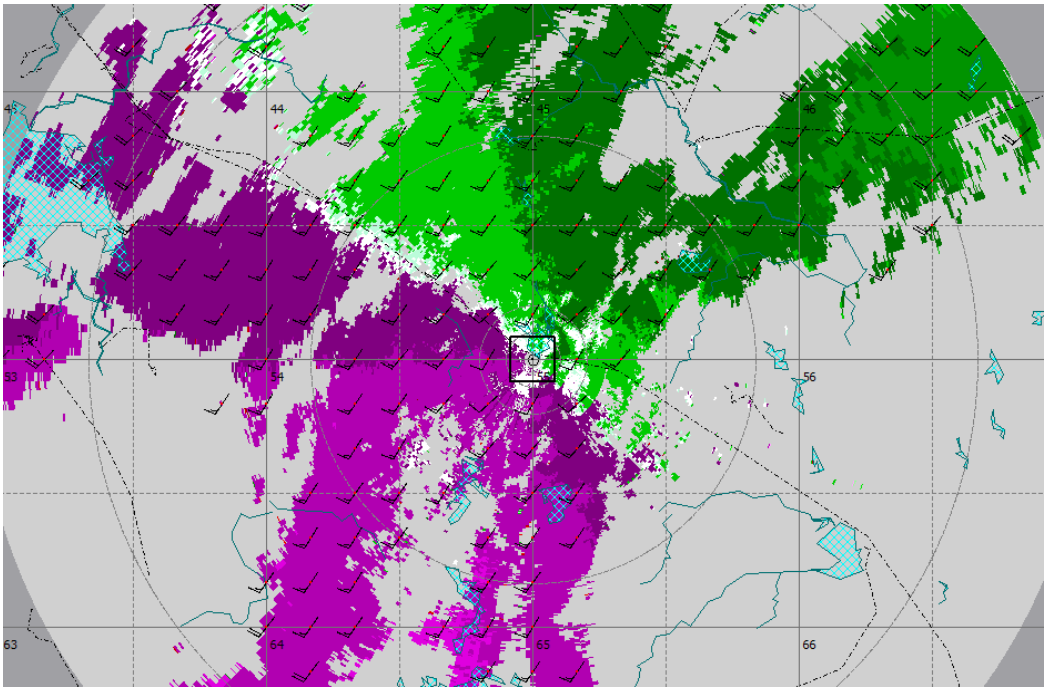


Рисунок 25 – Карта горизонтального ветра.

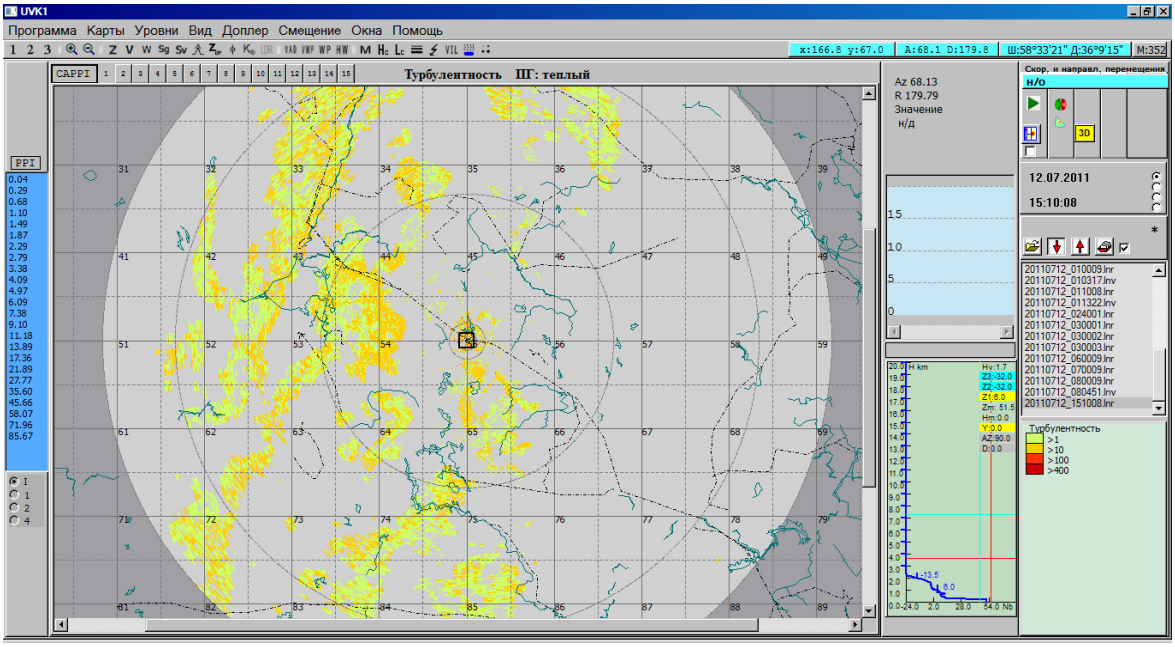


Рисунок 26 - Карта турбулентности.

2 Алгоритм построения карты PPI

Обычно радиолокационный луч посылается под углами места больше нуля. Поэтому луч, по мере удаления от радара, поднимается все выше и выше над поверхностью земли. Из-за этой геометрии, радиолокационные сигналы, отраженные от объектов вблизи радара представляют область низкого уровня, а отраженные сигналы от отдаленных объектов - область высоких уровней.

Радарная антенна посылает импульсы, вращаясь на 360 градусов под постоянным углом места. Возвращающееся радиоэхо от целей, полученное антенной и обработанное приемником, может быть отображено самым простым способом – прямым показом этих данных – это и есть ИКО (PPI), изображение на рисунке 27.

Радарная антенна обычно отображается в центре картинки, таким образом, расстояние от нее и высота над землей могут быть отложены как концентрические круги.

Нужно отметить, что высота эха увеличивается с расстоянием от радара не линейно, а по параболе, так как поверхность Земли изогнута и снижается ниже радарного горизонта.

Для стационарных установок север обычно представляется наверху изображения. Для движущихся установок, таких как судно и радары самолета, вершина представляет переднюю часть судна или самолета. Изображаемый сигнал – это отражаемость только при одном возвышении антенны. Таким образом, получают множество PPI, для всех возвышений антенны.

При отображении PPI на экране монитора радиолокационные данные отображаются в виде трапеций, образованных лучами соседних азимутов, на которые делится сектор обзора, и радиальными кольцами, проведенными через каждое ΔR, равное дискретности по дальности (рисунок 27).

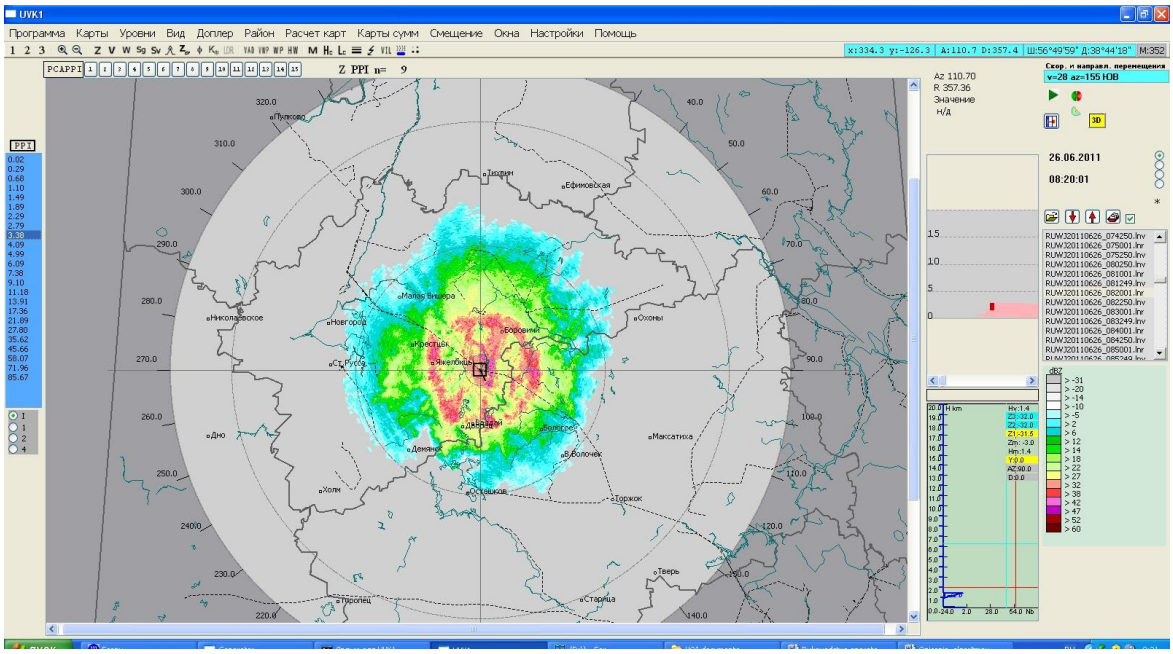


Рисунок 27 - Отображении PPI на экране монитора на угле места 3,38 градуса

3 Алгоритмы построения сечения CAPPI

3.1 Алгоритм CAPPI для скорости

Сечение на постоянном высотном уровне, известное как CAPPI, является радарным продуктом, который дает горизонтальное поперечное сечение данных на постоянной высоте.

Обычный CAPPI составлен из данных от каждого угла места, который попадает в высоту, установленную для поперечного сечения (зигзагообразные линии на рисунке 28). В первые годы данные просмотра выводились на указанных расстояниях непосредственно на катодном экране и фотографировались, чувствительное устройство захватывало каждое кольцо, когда оно было готово. Затем все сфотографированные кольца собирались в картинку. К середине 1970-ых развитие компьютеров позволило собрать данные в электронной форме и построить CAPPI более легко.

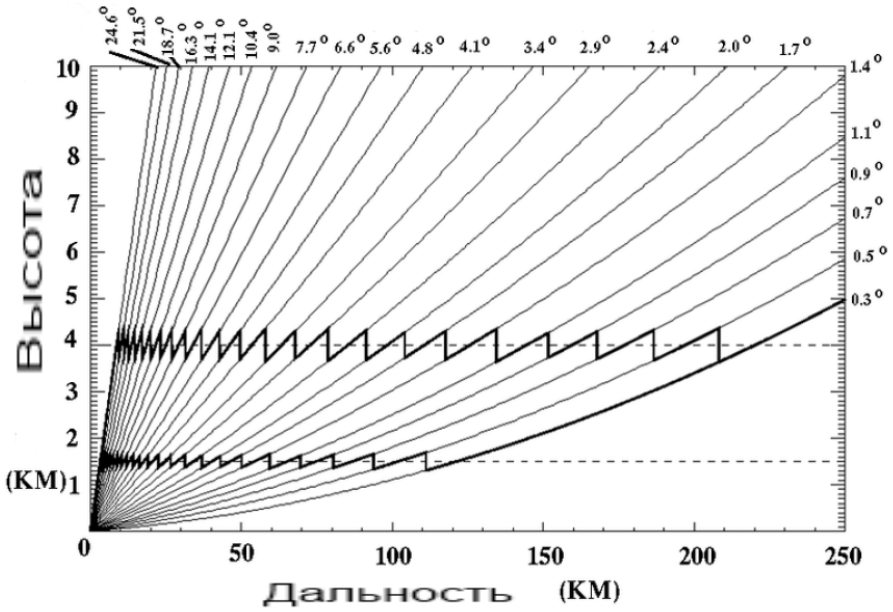


Рисунок 28 - Алгоритм построения горизонтального сечения.

Следует отметить, что при использовании способа отображения информации в виде CAPPI, данные будут отображаться “кольцами”, исходя из идеи метода (рисунок 29).

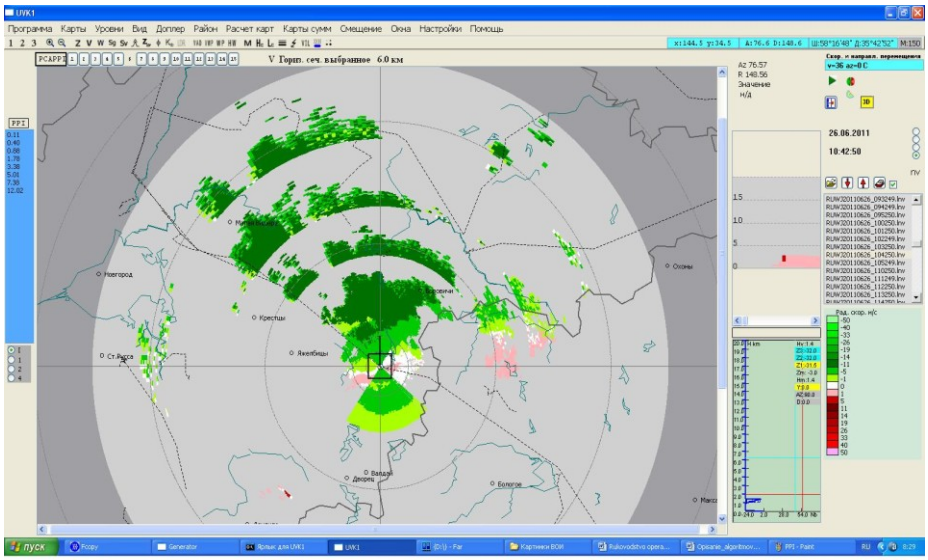


Рисунок 29 - Карта CAPPI для радиальной скорости

3.2 Алгоритм CAPPI для отражаемости

При осреднении отражаемости используется модифицированный алгоритм построения CAPPI (рисунок 30).

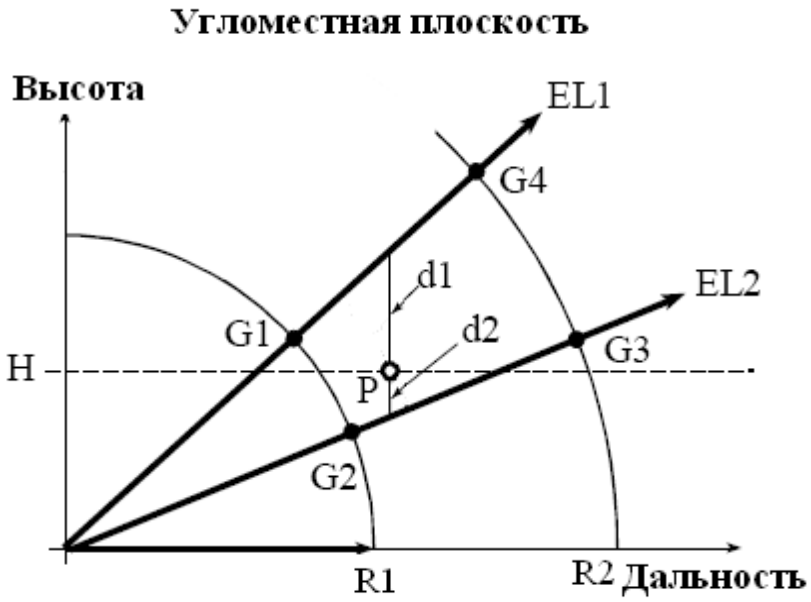


Рисунок 30 - К построению CAPPI

Модифицированный алгоритм заключается в следующем: два соседних луча с углами места (EL1 и EL2) на одном азимуте используются для определения отражаемости на промежуточном угле места.

G1-G4 – бины дальности, содержащие данные.

Затем определяется ближайшее расстояние по дальности до точки интерполяции P (R1 или R2), после чего вычисляется значение отражаемости в точке P:

- определяются минимальные расстояния от лучей до точки P (d1 и d2);

- вычисляются веса (w1 и w2) для ближайших бинов с данными (G1 и G2):

$$w1 = d2 / (d1 + d2); \quad (3.1)$$

$$w2 = d1 / (d1 + d2); \quad (3.2)$$

- вычисляется значение отражаемости в точке P:

$$ZP = G1 \times w1 + G2 \times w2. \quad (3.3)$$

Результаты расчета представлены на рисунке 31.

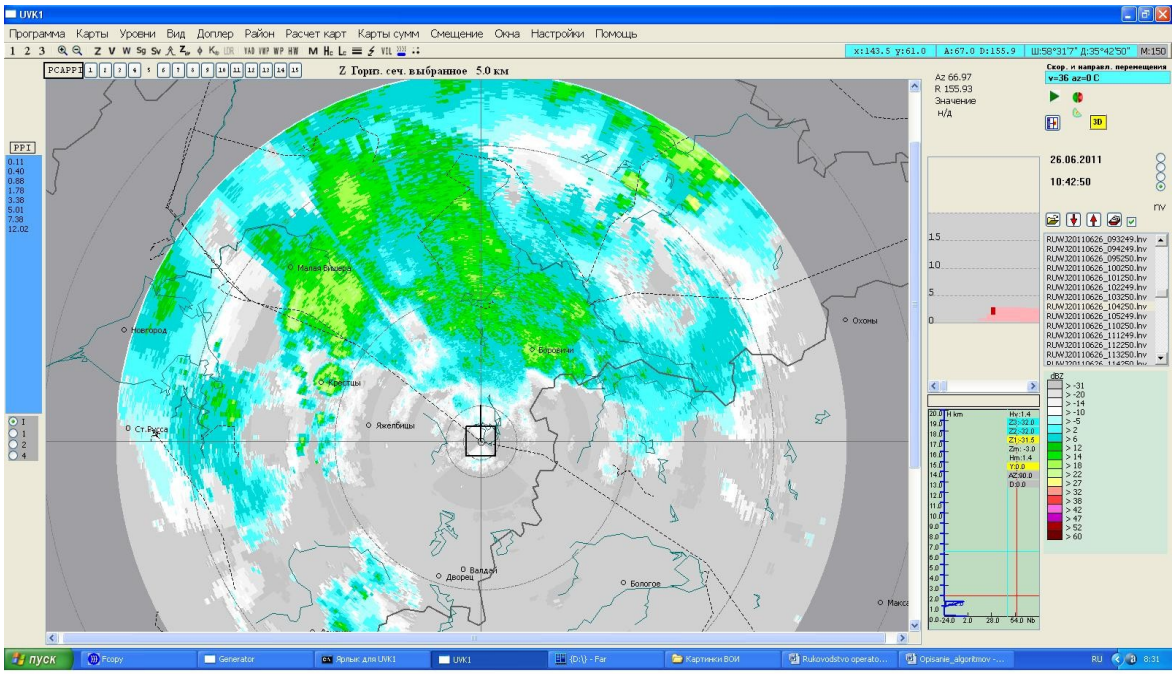


Рисунок 31 - Карта CAPPI для отражаемости. Кольца имеются только для отражаемостей менее порога облачности (минус 5 дБZ).

Согласно выбранной схеме линейной интерполяции данные между лучами получаются интерполяцией между ближайшим верхним и нижним лучом. Данные выше верхнего луча получаются экстраполяцией. Интерполяция и экстраполяция производится в нуль для дифференциальной отражаемости, или к фоновым значениям для остальных радиолокационных параметров.

3.3 Алгоритм псевдо-CAPPI

При представлении данных по принципу псевдо-CAPPI данные с минимального угла места транслируются на низлежащие уровни высоты по вертикали вниз до земли без интерполяции.

Данные между лучами считаются постоянными и принадлежащими к тому из лучей к которому они ближе по высоте. Таким образом, получаем резкий переход значений с принадлежащих первому лучу на принадлежащие второму, на середине угла между первым и вторым выбранными лучами.

4 Алгоритм построения вертикального сечения RHI

Вертикальное сечение радиолокационной отражаемости в любом направлении строится следующим образом.

По линии AB, проведенной между начальной (A) и конечной (B) точками вертикального сечения, с шагом ΔR строится последовательность вертикальных столбов - профилей радиолокационной отражаемости. Полученные значения позволяют заполнить карту отражаемости Z(R,h) между точками A и B.

Профиль радиолокационной отражаемости в каждом столбе строится с использованием первичных данных в полярной системе координат.

Заполнение столба происходит следующим образом. Для текущего столба определяются все точки пересечения его с параболами PPI. Между точками пересечения выполняется линейная интерполяция данных. За параболами (ниже первой и выше последней, с которой есть пересечение) интерполяция не выполняется. Для верхнего луча используется экстраполяция данных в фоновые значения или в нуль.

На рисунках 32-33 приведены примеры вертикальных разрезов радиолокационной отражаемости и скорости соответственно.

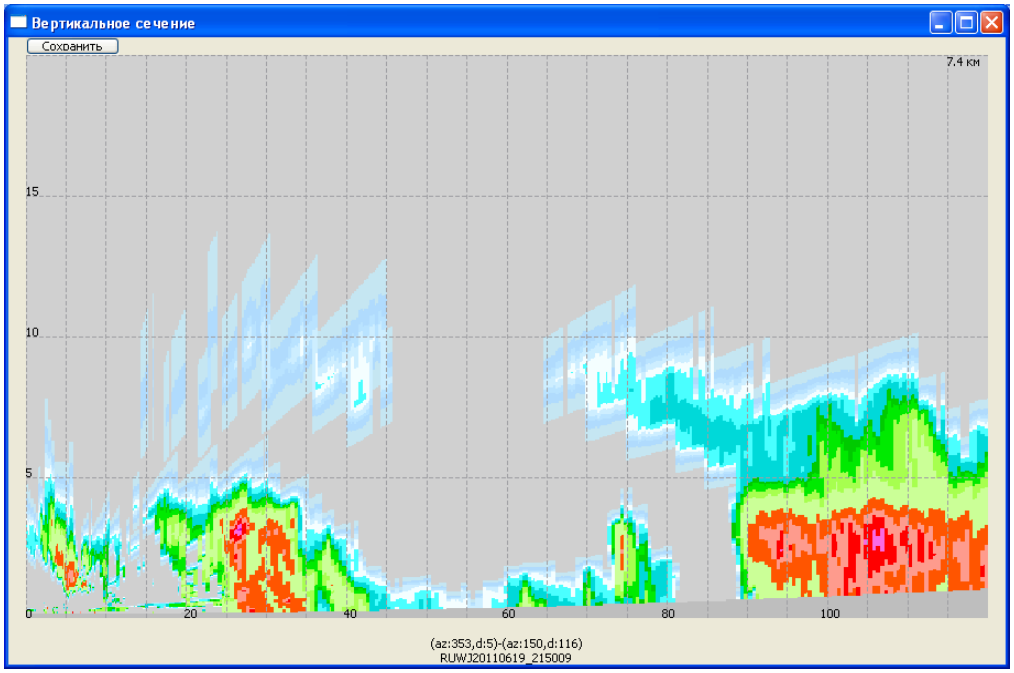


Рисунок 32 – Изображение вертикального разреза отражаемости.

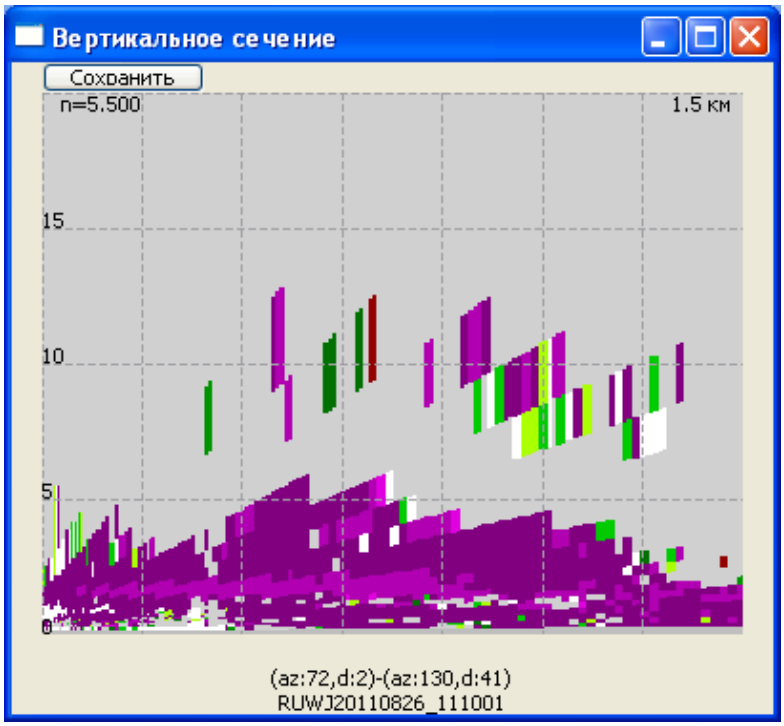


Рисунок 33 – Изображение вертикального разреза радиальной допплеровской скорости.

5 Алгоритм расчета интенсивности осадков

Интенсивность осадков определяется через значения радиолокационной отражаемости на уровне h_1 (обычно в теплый период 1-2 км, в холодный 0,5-1 км).

Для расчета используется известное Z-I соотношение:

$$Z = A \cdot I^b, \qquad (5.1)$$

где A=220, b=1,6. Коэффициенты A и b зависят от региона и периода года, поэтому они могут оптимизироваться для каждого ДМРЛ.

Преобразованная расчетная формула имеет следующий вид:

$$\log I = \frac{\log Z - \log A}{b}, \quad I = 10^{\log I}. \qquad (5.2)$$

6 Алгоритм расчета суммы осадков за период

Для формирования карт радиолокационных продуктов в коде BUFR, согласно Регламента Росгидромета, должны вычисляться суммы осадков за 1 ч, 3 ч, 6 ч, 12 ч и 24 ч.

Также ПО «УВК» позволяет вычислить суммы за период в несколько суток.

Суммы осадков $S(x, y)$ рассчитываются в клетках сетки 1x1, 2x2 и 4x4, в зависимости от выставленного разрешения.

Алгоритм заключается в следующем.

Для каждого обзора, попадающего в заданный интервал времени:

- строится карта интенсивности осадков $I_n(x, y)$;

- вычисляется время между соседними обзорами Δt_n. Если интервал времени превышает установленный в настройках период $\Delta t_{\max}$, то он ограничивается до максимального времени осадков (выставляется в настройках, обычно 10 мин);

- интенсивность осадков, выраженная в мм/ч, умножается на время между обзорами, выраженное в часах;

- полученное количество осадков с обзора прибавляется к интегральной сумме.

Таким образом, осадки со всех обзоров суммируются, и получается интегральная сумма за период времени, рассчитанная методом прямоугольников.

Также возможно применение метода трапеций для расчета интегральной суммы озадков за период времени. В этом случае в расчетах используется среднее значение интенсивности осадков между двумя соседними обзорами.

Расчетные формулы для метода прямоугольников и трапеций выглядят следующим образом:

Если $\Delta t > \Delta t_{\max}$, то $\Delta t = \Delta t_{\max}$. (6.1)

$$S(x,y) = \sum_{n=1}^{N} I_n(x,y) \cdot \Delta t_n ,. \qquad (6.2)$$

Выражение (5.2) представляет собой формулу численного интегрирования методом прямоугольников.

$$S(x,y) = \sum_{n=1}^{N} (I_n(x,y) + I_{n+1}(x,y)) \cdot 0.5 \cdot \Delta t_n . \qquad (6.3)$$

Выражение (6.3) представляет собой формулу численного интегрирования методом трапеций.

7 Алгоритм построения карт верхней и нижней границ облаков

Алгоритм построения карты верхней границы облаков заключается в следующем:

- в узлах пространственной сетки (x,y) строится вертикальный профиль радиолокационной отражаемости с использованием первичных данных в полярной системе координат. В вертикальном столбе выполняется линейная интерполяция между лучами. Если в наборе углов места имеются лучи, не содержащие данные, то интерполяция выполняется в «ноль», т.е. от ненулевого значения к фону.

Расчеты проводятся во всех клетках сетки, в которых радиолокационная отражаемость превышает пороговое значение.

Двигаясь от вершины столба вниз, определяется уровень, на котором радиолокационная отражаемость больше или равна заданному порогу (устанавливается оператором для Zmin для слоистообразных облаков, по умолчанию минус 5 dBZ). Этот уровень и представляет собой верхнюю границу облака в данной точке.

За нижнюю границу облачности в узле пространственной сетки принимается уровень, на котором впервые встречается радиолокационная отражаемость больше или равная заданному порогу (устанавливается оператором для Zmin для слоистообразных облаков, по умолчанию минус 5 dBZ) при движении от низа вертикального столба отражаемости, к его верху.

8 Алгоритм преобразования данных из полярных координат CAPPI в декартовы

Поверх матрицы азимут дальность накладывается квадратная сетка, с ячейками выбранного размера 1x1 2x2 4x4 км. Из рисунка 34 видно, что значение каждой квадратной ячейки должно определяться осреднением значений ряда ячеек исходной радиальной матрицы. Кроме того, очевидно, что их вклад неодинаков, и должен быть пропорционален площади перекрытия ячеек.

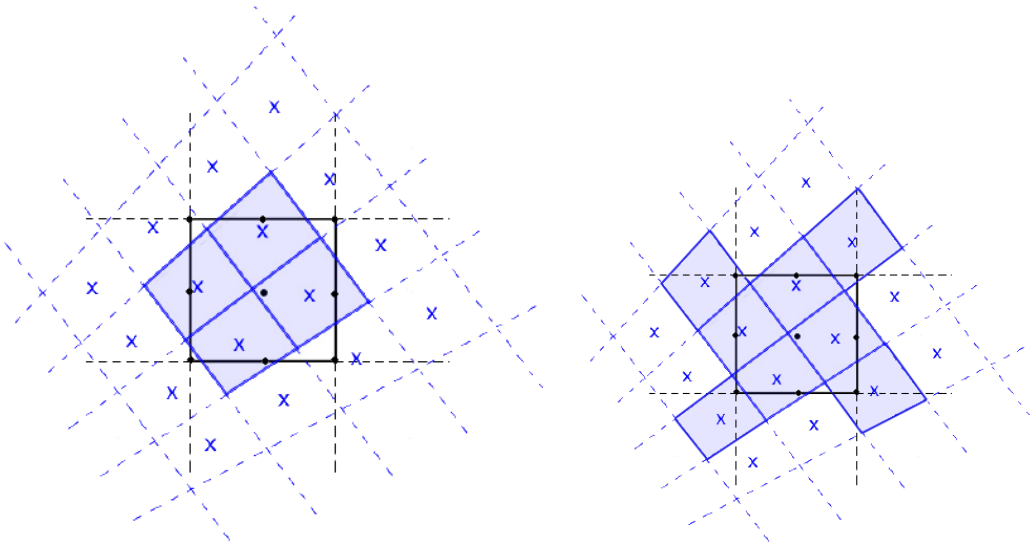


Рисунок 34 – Перекрытия ячеек полярной и декартовой сеток.

Во избежание продолжительной процедуры аналитического расчета площадей перекрытия ячеек, применяется следующий метод:

Для вычисления значения в каждом квадрата производится его сканирование по 9, 25 и 49 точкам для режимов 1x1, 2x2 и 4x4 соответственно. Значение величины, которой добавляется к суммарному значению этого квадрата. Точка не учитывается, если она не попадает в область исходной матрицы, или значение в ней является фоновым. Полученное суммарное значение усредняется по общему количеству обработанных точек. Причем, если количество обработанных точек составляет менее половины от общей площади ячейки – в случае если ячейка сетки находится на границе с

фоновыми значениями, или за пределами исходной матрицы – то эта ячейка отбрасывается, и ее значение в дальнейшем считается равным фоновому.

Таким образом, для каждой ячейки квадратной сетки получаем новое значение, определяемое взвешенным осреднением входящих в нее ячеек радиальной матрицы. В результате такого преобразования получаем новую матрицу значений размером 504x504 252x252 126x126, все ячейки которой имеют одинаковые линейные размеры. Пример изображения такой матрицы показан на рисунке 35.

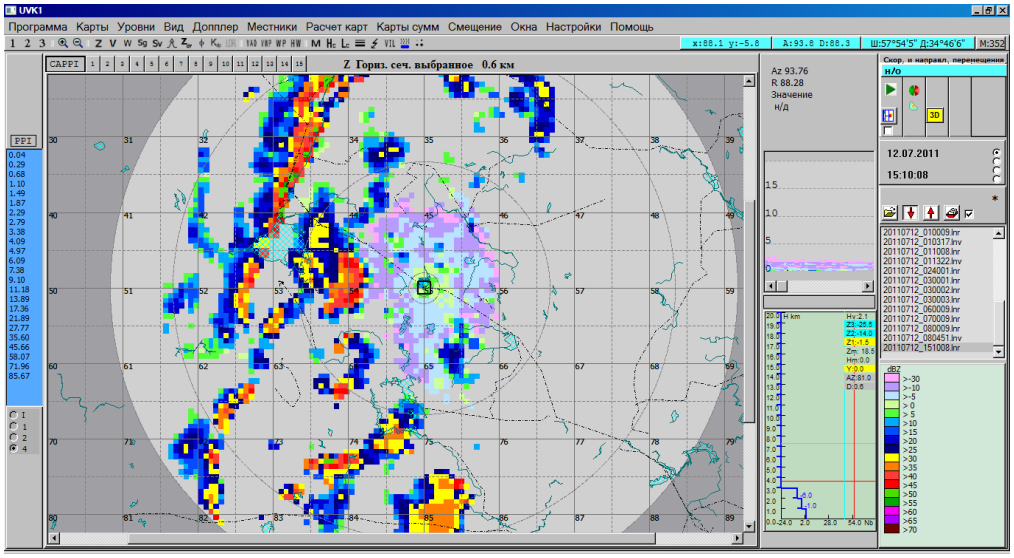


Рисунок 35 – Карта отражаемости для разрешения 4x4 км.

Для метеоявлений особенность обработки заключается в том, что данные для суммарного значения в квадрате являются не суммой всех значений, а максимальной величиной попавшего в квадрат явления. Отражаемость преобразуется с учетом минимальной отражаемости, а скорость без исключения максимальной и минимальной скорости. Обработка остальных радиолокационных параметров осуществляется стандартным способом, описанным выше.

9 Алгоритм создания и вычитания карты местников

Алгоритм вычитания карты «местников».

Для каждого режима работы радиолокатора «отражаемость» и «скорость» записываются по 2 файла, которые являются «местниками». Для режима «lnr» записывается 2 файла и для режима «lnv» 2 файла.

Запись местников осуществляется с помощью расширенного меню «Местники»-«Запомнить»- «Местник 1» или «Местник 2».

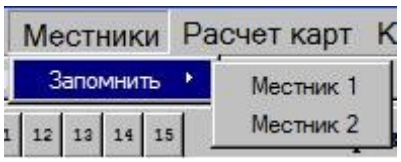


Рисунок 36 – Вкладка меню «Местники».

В качестве файлов «местников» выбираются архивные файлы, записанные при отсутствии облачности. Такие файлы содержат отражаемости от рельефа и растительности.

Местники можно перезаписывать сколько угодно раз. Рекомендуется использовать разные местники для теплого и холодного периодов года. Для файлов местников надо использовать файлы обзоров без вычитания местников.

При открытии любого текущего радиолокационного файла в узлах 3-х мерных полярных объемов происходит вычитание данных «местника» из данных открытого для анализа файла.

В массив «местника» вносится максимальное значение в узле, выбранное из двух файлов.

Вычитание местников происходит по мощности. Отражаемости Z, в узлах сетки переводятся в мощность по формулам:

$$Ртек=10 \log(Zтек) \quad (9.1)$$

$$Рмест=10(\log Zмест) \quad (9.2)$$

Запись местников осуществляется выбором одного из файлов обзоров, выполненных в безоблачную погоду (рисунок 37).

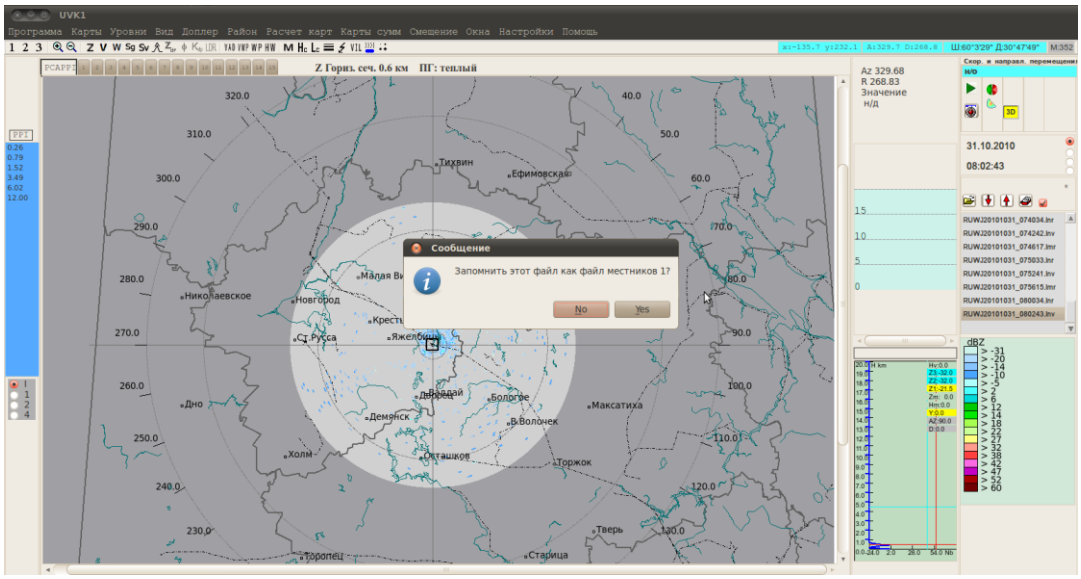


Рисунок 37 – Выбор файла местников

10 Алгоритм VAD

Допплеровский радар способен измерять компоненту скорости движения объекта по направлению к радару или от него (рисунок 12).

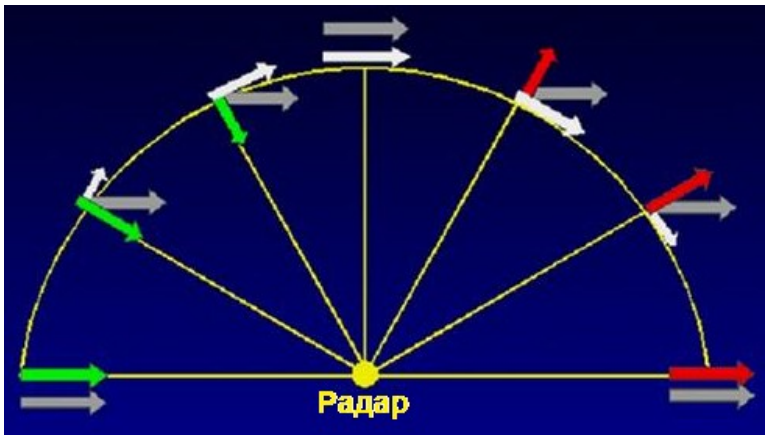


Рисунок 38 - Компоненты скорости ветра

Серая стрелка – однородная скорость ветра.

Зеленая стрелка – составляющая поля скорости ветра к радару.

Красная стрелка – составляющая поля скорости ветра от радара.

Белая стрелка – составляющая поля скорости ветра перпендикулярная к радарному лучу.

С помощью метода конического сечения, реализуемого одним допплеровским радиолокатором можно получить вертикальный профиль скорости ветра (значение и направление). В зарубежной литературе метод получил название VAD *(velocity-azimuth-display) - индикатор скорость - азимут.* Идея метода состоит в том, что в предположении неизменности скорости и направления ветра (или линейного изменения составляющих ветра) в любом горизонтальном сечении, охваченном образующими наклонного конического сечения, зависимость радиальной скорости от азимута будет описываться синусоидой, параметры которой связаны с модулем и направлением ветра.

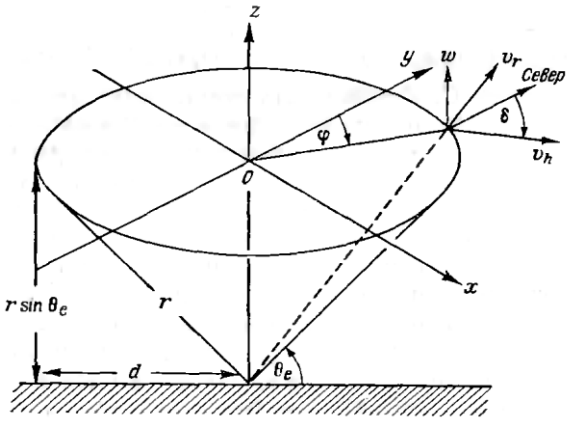


Рисунок 39- Геометрия измерения скорости при круговом сканировании.

Радиальная компонента скорости ветра, измеряемая при круговом вращении антенны, зависит от φ следующим образом:

$$v_r = w \sin \theta_e + v_h \cos \theta_e \cos (\delta - \varphi), \qquad (10.1)$$

где $D = \delta + \pi$ — направление откуда дует ветер, а w и v_h соответственно вертикальная и горизонтальная компоненты скорости ветра. Преобразуя второй член выражения и используя соотношения, связывающие компоненты скорости в декартовой и полярной системах координат, приведем к следующему виду:

$$v_r = w \sin \theta_e + u_0 \sin \varphi \cos \theta_e + v_0 \cos \varphi \cos \theta_e. \qquad (10.2)$$

При ряде очень строгих допущений вычисляются горизонтальные составляющие скорости ветра u_0 и v_0, а также его абсолютная величина v_h и направление D:

$$u_0 = b_1/\cos\theta_e, \tag{10.3}$$

$$v_0 = a_1/\cos\theta_e, \tag{10.4}$$

$$v_h = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}, \tag{10.5}$$

$$v_h = \left(u_0^2 + v_0^2\right)^{1/2} = \frac{-\left(a_1^2 + b_1^2\right)^{1/2}}{\cos\theta_e} \ . \tag{10.6}$$

$$D = \text{arctg}(b_1/a_1) - \pi. \tag{10.7}$$

Метод позволяет получить вертикальный профиль горизонтального ветра и горизонтальную дивергенцию

$$div v_h \equiv \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y}\right) = -\frac{a_0}{r\cos\theta_e} + \frac{2w}{r}\,\text{tg}\,\theta_e, \tag{10.8}$$

для деформации скорости

$$\left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_y}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}\right)^2\right]^{1/2} = -\frac{2\left(a_2^2 + b_2^2\right)^{1/2}}{r\cos\alpha}. \tag{10.9}$$

Операции с исходным массивом данных для каждого круга, т.е. для каждой фиксированной высоты *H,* определяют первые три коэффициента ряда Фурье:

$$v_r = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n\cos n\theta_e + b_n\sin n\theta_e\right) \tag{10.10}$$

$$a_0 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\tilde{v}_{ri}; \quad a_1 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\tilde{v}_{ri}\cos\varphi; \quad b_1 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\tilde{v}_{ri}\sin\varphi\,, \tag{10.11}$$

где N = число отсчетов по азимуту с ненулевыми данными**.**

Расчеты по формулам (10.10)-(10.11) выполняются для неподвижного угла места и нескольких расстояний от радара, при этом получаем

вертикальный профиль скорости ветра и профиль направления ветра. При эксплуатационных измерениях мы не получаем данные от всех азимутов, и зависимость скорости от азимута не является совершенно синусоидальной, именно поэтому $\overline{V_h}$ и $\bar{w}$ оцениваются наименьшим квадратом пригодности или методом подобия.

Хотя один допплеровский радар фиксирует только компоненту ветра в направлении по радиусу от радара, он может идентифицировать широкий спектр погодных явлений.

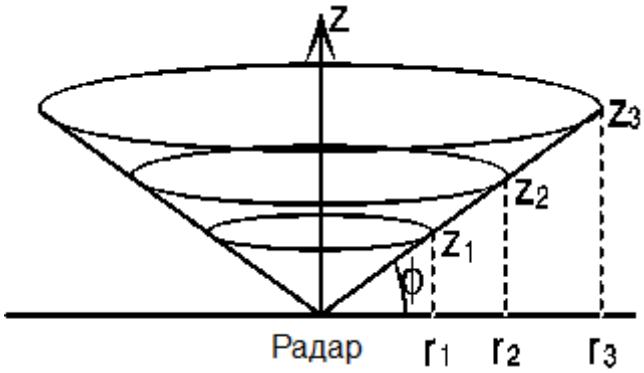


Рисунок 40 - Геометрия уровней для скорости

Успешная работа этого алгоритма опирается на условие, что есть достаточно радиоэха, чтобы получить когерентные доплеровские скорости. Т.е. N - число отсчетов по азимуту с ненулевыми данными достаточно для восстановления синусоиды. Компромиссы, возможно, должны быть сделаны в определении оптимальной наклонной дальности для VAD. Вблизи засветка от земли может полностью забивать данные, а на больших дальностях разрешение радара уменьшается.

Выходными данными VAD алгоритма являются:

- таблица горизонтального направления ветра как функции высоты в течение времени наблюдения;

- таблица горизонтальной скорости ветра как функции высоты в течение времени наблюдения;

- таблица горизонтальной дивергенции как функции высоты в течение времени наблюдения;

- таблица вертикальной скорости ветра как функции высоты для этого времени наблюдения.

Для управления обработкой данных в алгоритме VAD в файле dmrlmain.ini задано несколько параметров:

KVADd=250.0 диапазон дальностей для которых оценивается VAD;

KVADmn=25 минимальное количество данных, при котором вычисляются VAD;

KVADporog=0.0 исключение некоторого порогового модуля скорости вблизи нуля для борьбы с данными от местников;

KVADdp=30.0 диапазон дальностей исключения.

Индикатор «скорость – азимут» редко используется непосредственно, он служит основой для получения профиля скорости и направления ветра (WIPR) и VAD Wind Profile (VWP), а также для восстановления горизонтального поля скоростей на заданной высоте.

11 Алгоритм расчета WIPR

Для получения вертикального профиля ветра и скорости ветра в горизонтальном и вертикальном направлении используются геометрические расчеты. Расчет и отображение вертикального профиля скорости и направления ветра основан на алгоритме VAD.

Если эти расчеты будут выполнены для неподвижного угла места и нескольких расстояний от радара, то мы получим вертикальный профиль скорости ветра и профиль направления ветра. В эксплуатационном измерении мы не получаем данные от всех углов азимута, и зависимость скорости от азимута не является совершенно синусоидальной, именно поэтому $\overline{V_h}$ и $\bar{w}$ получают методом наименьших квадратов для нулевой гармоники.

12 Алгоритм расчета VWP

Восстановление направления горизонтальных ветров, полученных из выходных данных профилей ветра VAD (метод круговых диаграмм), как функции высоты. График, где высота - вертикальная ось, а время - горизонтальная ось (так называемый Индикатор высота - время), который изображает изменение ветра со временем на различных высотах. Этот индикатор полезен для наблюдения локальных изменений в вертикальном сдвиге ветра, таких как низкоуровневые ветра, увеличение сдвига скорости, близлежащих реактивных струй. Этот продукт часто упоминается ошибочно как VAD.

VWP походит на данные радиозонда реального масштаба времени, который в вашем распоряжении каждые несколько минут. VWP изображает поток воздуха вокруг радара и обеспечивает более полное понимание моделей общей циркуляции. Изменения в вертикальном профиле ветра - ключи к разгадке расположения турбулентности, инверсий, пограничных слоев, и сдвига ветра. Они также полезны в определении линии фронта, тепловой адвекции, и реактивных струй. Различные цвета используются, чтобы показать надежность данных ветра. Например, черные глифы ветра указывают на то, что было доступно много рассеивателей в определенном азимуте и возвышении, таким образом очень точные значения ветра выведены на экран. VWP является единственным продуктом, где простое отсутствие данных (графически изображенный как “ND”) может самостоятельно быть индикатором. Это предполагает меньше рассеивателей, что подразумевает сухой воздух (распространенный позади холодных фронтов). Этот же самый метод позволяет операторам просматривать изменения в облачном покрытии выше области наблюдения радиолокатором.