

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(Росгидромет)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВЫСОКОГОРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

ДОКЛАДЫ

**ВСЕРОССИЙСКОЙ ОТКРЫТОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
ПО ФИЗИКЕ ОБЛАКОВ И
АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ
НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ,
ПОСВЯЩЕННОЙ 80-ЛЕТИЮ ЭЛЬБРУССКОЙ
ВЫСОКОГОРНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ АН СССР**

7–9 октября 2014г.

ЧАСТЬ 1

Нальчик
2015

Сборник содержит доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, проходившей в Нальчике с 7-го по 9 октября 2014 года.

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель: Тапасханов В.О. – директор ФГБУ «ВГИ»

Заместители председателя: Федченко Л.М. – научный руководитель программ ФГБУ «ВГИ»

Калов Х.М. – заместитель директора ФГБУ «ВГИ» по научной работе

Абшаев М.Т. – заместитель директора ФГБУ «ВГИ» по активным воздействиям

Члены оргкомитета:

Агзагова М.Б. – главный бухгалтер ФГБУ «ВГИ»

Бареева М.В. – ученый секретарь ФГБУ «ВГИ»

Инюхин В.С. – заведующий отделом активных воздействий ФГБУ «ВГИ»

Ашабоков Б.А. – заведующий отделом физики облаков ФГБУ «ВГИ»

Аджиев А.Х. – заведующий отделом стихийных явлений ФГБУ «ВГИ»

Колычева В.Г. – заместитель директора ФГБУ «ВГИ» по общим вопросам

Лиев К.Б. – заведующий лабораторией радиометеорологии ФГБУ «ВГИ»

В работе конференции приняли участие представители Росгидромета, его территориальных органов, ученые НИУ Росгидромета и других ведомств, руководители и специалисты противоградовых служб Российской Федерации, Грузии, Армении, Молдовы.

Конференция отметила повышение актуальности работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы на фоне наблюдающихся климатических изменений, приводящих к увеличению частоты и интенсивности опасных природных явлений, дефициту водных ресурсов, а также активную научную деятельность в области активных воздействий ведущих научно-исследовательских учреждений Росгидромета, промышленных организаций, занимающихся разработкой и производством технических средств активных воздействий на облачные процессы, а также специалистов противоградовых и противолавинных подразделений Росгидромета.

На конференции заслушаны и обсуждены 99 докладов, в том числе 7 пленарных, представленных на двух секциях:

- Секция 1. «Исследование процессов облако- и осадкообразования» (38 докладов, в том числе 25 стендовых);

- Секция 2. «Методы и технические средства активных воздействий на гидрометеорологические процессы» (54 доклада, в том числе 33 стендовых).

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Дядюченко В.Н., Стасенко В.Н.</i> Перспективы развития работ по геофизическому мониторингу.....	7
<i>Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Малкарова А.М.</i> Состояние и перспективы развития техники и технологии противорадовой защиты..	13
<i>Корнеев В.П., Колосков Б.П., Шукин Г.Г., Абшаев М.Т., Данелян Б.Г.</i> Применение Российских технологий активных воздействий для снижения ущерба от аномальных погодных явлений и техногенных катастроф	24
<i>Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Шаповалов А.В.</i> Численная нестационарная трехмерная модель кучево-дождевого грозового облака.	30
<i>Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А.</i> Теоретические исследования механизма образования града при естественном развитии облаков и активном воздействии с целью усовершенствования метода воздействия на градовые процессы.....	39
<i>Азаров А.С., Борисов Ю.А., Данелян Б.Г., Петров В.В., Струнин М.А., Фомин Б.А., Хаттатов В.У., Вакуловский С.М., Синькевич А.А.</i> Новые возможности в проведении исследований атмосферных процессов и мониторинга окружающей среды с использованием самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».....	50
<i>Аджиев А.Х., Чочаев Х.Х.</i> Состояние и перспективы активных воздействий на снеголавинные процессы.	61
<i>Секция 1</i> <i>Исследование процессов облако- и осадкообразования. Численное моделирование облачных процессов. Лабораторное моделирование и натурные исследования облачных процессов. Аппаратура и методы измерения</i>	
<i>Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Морозов В.Н.</i> Моделирование эволюции электрической структуры грозового облака с помощью численной нестационарной трехмерной модели.	70
<i>Дрофа А.С.</i> Трехмерное численное моделирование воздействия гигроскопическими реагентами на конвективное облако.	80
<i>Клейменова А.В., Колосков Б.П., Сергеев Б.П., Частухин А.В.</i> Численное моделирование искусственного увеличения осадков из слоистообразных облаков самолетными аэрозольными генераторами и пиропатронами.	87

<i>Пастушков Р. С.</i> Численная модель активных воздействий на конвективные облака гигроскопическими и льдообразующими веществами.	94
<i>Шаповалов А.В., Шаповалов В.А.</i> Результаты разработки программного обеспечения трехмерного представления геофизической информации.	100
<i>Синькевич А.А., Довгалик Ю.А., Веремей Н.Е., Куров А.Б., Баранова Н.И.</i> Исследование влияния повышенной концентрации естественного аэрозоля на развитие конвективного облака.	107
<i>Ашабоков Б. А., Кагермазов А.Х., Шаповалов А.В.</i> Формирование объемных начальных условий при моделировании градового облака.	117
<i>Ашабоков Б.А., Тапасханов В.О., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А.</i> Состояние и перспективы математического моделирования облачных процессов в ФГБУ "Высокогорный геофизический институт"..	125
<i>Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А.</i> Трехмерная модель конвективного облака с учетом электрических процессов: некоторые результаты расчетов параметров грозоградовых облаков.....	133
<i>Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н.</i> Программное обеспечение приема и представления информации нового российского ДМРЛ-С.	141
<i>Шаповалов В.А., Шаповалов М.А.</i> Распознавание опасных конвективных процессов с применением алгоритмов нейронных сетей (Neural Network) и компьютерного зрения (Computer Vision).....	148
<i>Шаповалов В.А., Созаева Л.Т., Шаповалов М.А.</i> Расчет поляризационных характеристик частиц осадков с использованием данных о спектрах капель, полученных по трехмерной модели конвективного облака.	154
<i>Увижева Ф.Х.</i> Некоторые новые задачи типа Стефана для уравнения теплопроводности.....	162
<i>Увижева Ф.Х.</i> Методы определения физических характеристик тепло- и массопереноса в неоднородных средах.....	169
<i>Закинян Р.Г., Закинян А.Р., Лукинов А.А.</i> К скорости распространения волн во вращающейся атмосфере.	176
<i>Жекамухов М.К., Калов Х.М., Калов Р.Х.</i> Испарение облачных капель на фронте распространения сверхзвуковых волн.....	187

<i>Созаева Л.Т., Жангоразова М.М.</i> Исследование радиолокационных характеристик осадков и облачных частиц несферической формы.	195
<i>Жакамихов Х.М.</i> Численное исследование параметров Стокса в развивающемся конвективном облаке для миллиметровых и сантиметровых радиоволн.....	200
<i>Синькевич А.А., Куров А.Б., Волков Н.Н., Баранова Н.И.</i> Лабораторные исследования влияния естественного аэрозоля на процессы кристаллизации капель.....	212
<i>Хучунаев Б.М., Хучунаева С.Б., Хучунаев А.Б.</i> Концепция механизма образования града на основе натуральных и лабораторных исследований.	215
<i>Хучунаев Б.М., Тлисов М.И., Ташилова А.А., Теунова Н.В., Хучунаев А.Б.</i> Лабораторные исследования роста града на крупяных и капельных зародышах.	225
<i>Хучунаев Б.М., Ташилова А.А., Теунова Н.В., Ажахова Р.А.</i> Лабораторные исследования взаимодействия реагента с облачной средой.....	231
<i>Струнин А.М., Струнин М.А.</i> Спектральные характеристики турбулентности и турбулентных потоков в конвективных облаках над о. Куба по данным самолетных наблюдений.....	238
<i>Данелян Б.Г., Петров В.В., Кирич Д.В.</i> Современный комплекс самолета лаборатории Як-42 для задач регулирования осадков. Результаты измерений и воздействий.	247
<i>Живоготов Д.Н., Струнин М.А.</i> Достоверность измерений температуры и скорости ветра с борта самолета-лаборатории нового поколения Як-42Д «Росгидромет».	256
<i>Михайловский Ю.П., Зайнетдинов Б.Г., Попов И.Б., Синькевич А.А.</i> Самолет-лаборатория ЯК-42 «Росгидромет» как средство контроля электрических характеристик атмосферы и облаков.	265
<i>Базанин Н.В., Волков В.В., Петров В.В.</i> Бортовой комплекс для регистрации, обработки и визуализации данных измерений с борта самолета-лаборатории нового поколения ЯК-42Д «Росгидромет».....	274
<i>Тапасханов В.О., Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А.</i> Центр мониторинга опасных конвективных процессов над южным регионом Российской Федерации.	285
<i>Абшаев А.М., Гузоев Т.Х.</i> АПК сбора метеорологической информации на базе сети противорадовых установок «Элия-2».....	293

<i>Мазуров Г.И. , Белогуб В.П., Акселевич В.И.</i> Сравнение результатов лабораторного моделирования и натуральных экспериментов.....	299
<i>Стулов Е.А., Плауде Н.О., Паршуткина И.П., Данелян Б.Г.</i> Связь концентрации облачных ядер конденсации с микроструктурой атмосферного аэрозоля.....	311
<i>Абшаев А.М., Абшаев М.Т.</i> Радиолокационные критерии распознавания градовых облаков и крупного града.....	317
<i>Жарашуев М.В.</i> Метод автоматической идентификации области будущего градообразования.....	328
<i>Калов Х.М., Калов Р.Х.</i> Исследование турбулентности в конвективных облаках и околооблачном пространстве с использованием пассивных радиолокационных отражателей.....	336
<i>Синькевич А.А., Куров А.Б.</i> Использование результатов зондирования облаков с помощью спутника МЕТЕОСАТ для оценки эффекта воздействий.	346

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАБОТ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ

В.Н. Дядюченко, В.Н. Стасенко
ФГБУ «НИЦ «Планета», г. Москва

Организации Росгидромета за последние шесть лет получили существенное развитие в области мониторинга опасных геофизических явлений и процессов (ОГФЯП). Реализуется план мероприятий по созданию и развитию системы мониторинга ОГФЯП (СМ) с использованием наземных, самолетных и космических средств, с целью своевременного обнаружения ОГФЯП, определения степени их опасности и выдачи своевременного предупреждения для отраслей экономики и населения. Такая масштабная задача решается в стране впервые. Она предусматривает создание распределенной системы оперативных геофизических наблюдений над территорией РФ, включающей наблюдения Солнца в оптическом и радиодиапазонах, лидарное и СВЧ-зондирование атмосферы, ионосферные и магнитометрические наблюдения, а также создание единой сети метеорологических радиолокаторов, грозорегистраторов и других средств дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА). Завершиться данная работа должна созданием многоуровневой информационной структуры Росгидромета в составе центров геофизического мониторинга регионального и федерального уровней, которые способны готовить информационные продукты разной специализации и степени обобщенности (рис.1).

Определено, что СМ должна состоять из следующих информационных компонентов: гелиогеофизический, магнитного поля и ионосферы, радиотомографический, ракетное и лидарно-радарное зондирование атмосферы, регистрация СДВ и КВ сигналов, космический, средней атмосферы и грозопеленгация. В рамках указанных компонентов информационные продукты от тематических (региональных) центров геофизического мониторинга, формирующихся на базе НИУ, уже поступают в Оперативный геофизический центр (ОГЦ) на базе ФГБУ «НИЦ «Планета» для комплексной обработки и представления потребителям обобщенной, аналитической и экстренной информации о геофизической обстановке над территорией РФ с использованием информационно-телекоммуникационной системы Росгидромета.

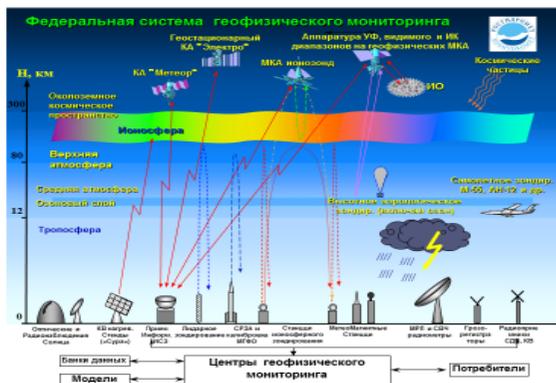


Рис. 1. Федеральная система геофизического мониторинга.

Фактически сегодня заложен и реализуется потенциал быстрого развития комплексных методов обработки цифровых данных СМ, в том числе, с применением численных моделей разного уровня сложности.

Тесная кооперация НИУ Росгидромета с отечественными разработчиками и изготовителями позволила за короткий срок создать целый ряд перспективных видов оборудования мирового уровня. В течение 2-3-х лет опытной эксплуатации были отработаны как отдельные его виды для тематической обработки геофизических данных, так и целый ряд АПК (в ААНИИ и ИПГ) для комплексной обработки и подготовки интегрированных информационных продуктов.

В частности, созданы две геофизические ракеты - МР-30 (НПО «Тайфун») и МЕРА (ЦАО), для зондирования атмосферы и ближнего космоса до высот соответственно 300 и 100км. Проходит переоснащение станций запуска геофизических ракет на острове Хейса, в п.п. Тикси и Капустин Яр (рис. 2).



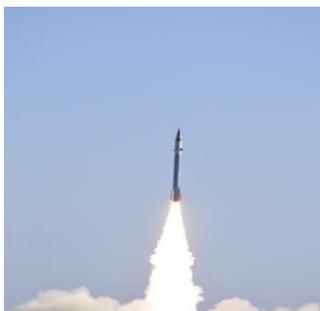


Рис. 2. Геофизическая ракета МР-30.

Создается высокотехнологичная система для обнаружения быстроразвивающихся опасных явлений погоды на базе первого отечественного доплеровского метеорадиолокатора со сжатием импульса и кросс-поляризационной обработкой сигналов ДМРЛ-С, разработанного совместными усилиями научных центров Росгидромета, прежде всего ЦАО, ВГИ и ГГО, а также концерна ПВО «Алмаз-Антей». К настоящему времени установлены первые 23 из 140 планируемых к размещению ДМРЛ-С. Создается доступное для потребителей единое метеорадиолокационное поле в режиме 10-минутного обновления. Открываются новые возможности по обеспечению прогностических подразделений Росгидромета, организаций МЧС, коммунальных служб, служб безопасности транспорта и многих других потребителей более точной информацией об опасных природных явлениях, таких, как резкие изменения погоды, ливни, град, смерчи и шквалы, паводки, сели. Модификация этого радара - ДМРЛ-10 сможет в перспективе заменить устаревшие МРЛ-5 в противогородовых службах страны (рис.3).

На базе отечественной системы глобального позиционирования ГЛО-НАСС в ЦАО создается система высотного аэрологического зондирования атмосферы, включая озоновый слой.

По заказу Росгидромета (ЦАО) создан первый отечественный самолет-лаборатория для специальных геофизических исследований Як-42Д (рис.4). Первые результаты исследований, проведенных с его участием, очень обнадеживают.

Сегодня на Европейской территории РФ приступили к работе в опытном режиме более 40 грозорегистраторов, объединяющихся в единую СМ с возможностью последующего распространения зоны обзора на всю территорию России. На очереди оснащение этим оборудованием районов Сибири и Дальнего Востока. Интегрирование данных об облачной атмосфере, включая электрические характеристики атмосферных образований, даст возмож-

ность не только прогнозировать факт появления опасных явлений погоды, но и их интенсивность, степень опасности (предполагаемый ущерб) для конкретных погодозависимых производств и служб.

Планируемая сеть метеорологических радиолокационных станций (2011-2015 гг.)

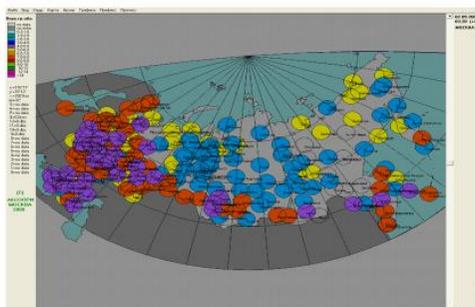


Рис.3. Планируемая сеть ДМРЛ-С.

Целенаправленное развитие получили методы и средства ДЗА, позволяющие получать в режиме реального времени цифровую информацию о параметрах атмосферы во всей ее толще, в том числе об облаках, осадках и грозových разрядах - молниях любого типа.



Рис.4. Самолет-лаборатория Як-42.

Указанные средства, объединенные в единую информационную сеть, позволили создать в ФГБУ «ВГИ» Центр мониторинга геофизической обстановки над южным регионом РФ (МГФОЮ).

Регион Северного Кавказа представляет наибольший интерес с точки зрения изучения и предсказания наблюдающейся здесь взрывной конвекции, развития мощных грозоградовых процессов и осадкообразующих систем конвективного происхождения, с которыми связаны случаи больших осадков и опасность наводнений. Условия их формирования и причинно-следственные взаимосвязи, определяющие развитие таких аномальных по

последствиям систем и процессов, требуют применения адекватных методов и средств исследования физических свойств всей толщи атмосферы.

В литературе появляются сведения о влиянии на ионосферу значительных суммарных электрических токов, протекающих между грозовыми облаками и верхними слоями атмосферы в рамках глобальной электрической цепи. В этой связи одной из важных теоретических и практических задач является количественная оценка влияния, которое оказывают процессы в верхних слоях атмосферы, инициированные под влиянием Солнца, на погодные условия в тропосфере и наоборот, влияния регионального грозового генератора на свойства ионосферы.

Важным звеном комплексной системы раннего предупреждения является космическая группировка гидрометеорологических, океанографических, гелиогеофизических спутников и спутников мониторинга природной среды России. Чтобы не зависеть от зарубежной спутниковой информации, являющейся, по сути, стратегической, нужно иметь национальную группировку в составе трех полярно-орбитальных и трех геостационарных метеоспутников. Готовится к запуску первая в мире отечественная система гидрометеорологического, климатического и геофизического мониторинга в квазинепрерывном режиме Северных приполярных районов планеты на высокоэллиптической орбите «Арктика М». Эти планы отражены в утвержденной Правительством Российской Федерации и подписанной В.В. Путиным Стратегии деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года. При этом два метеоспутника предполагается запустить на космическую орбиту еще в текущем году. Кроме того, по специальному решению Правительства России готовится к запуску система из пяти геофизических спутников, которые в непрерывном режиме будут передавать в Росгидромет данные о космической погоде. Первый из этой серии геофизических спутников готовится к запуску в 2015 году (рис.5).

Установленные в региональных центрах НИЦ «Планета» (Москва, Новосибирск, Хабаровск) станции приема цифровой информации DUALMEOSPOLAR осуществляют прием данных с 18 отечественных и зарубежных космических аппаратов (КА) разного назначения. Специальные геофизические и метеорологические КА оснащены большим количеством геофизических датчиков, которые совместно с наземными и самолетными данными позволяют осуществлять комплексные многоуровневые наблюдения геофизической обстановки над территорией РФ с недостижимой ранее точностью и оперативностью.



Рис.5. Российская спутниковая система наблюдения Земли.

Росгидромет сегодня обладает самой современной и продвинутой государственной системой приема, обработки и представления спутниковой информации, эта система по объему данных (более 280 Гбайт/сутки), перечню решаемых задач и номенклатуре выпускаемой информационной продукции (более 350 видов в сутки), размеру архива данных, имеющего статус Госфонда Российской Федерации, количеству потребителей федерального и регионального уровня (более 460) является крупнейшей в России и одной из самых крупных в мире, а по охвату оперативным космическим мониторингом поверхность Земли (более 1/5) - самой крупной в мире. Разработка и ввод в эксплуатацию этой территориально распределенной системы космического мониторинга, выполненной специалистами Росгидромета, Роскосмоса, Российской академии наук и Высшей школы была отмечена Премией Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 2011 год.

В заключение следует отметить, что в результате реализации задач по геофизическому мониторингу в Росгидромете заложен потенциал современного и будущего развития наблюдательных сетей, методов диагноза и прогноза опасных явлений.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЫ

А.М. Абшаев¹, М.Т. Абшаев¹, А.М. Малкарова²

¹ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,

г. Нальчик, <abshaev@mail.ru>

²УСНП Росгидромета, г. Москва, <amalkarova@mcc.mcom.ru>

1. О состоянии противоградовых работ

Нарастающее влияние глобального потепления климата ведет к увеличению частоты и интенсивности градобитий, а также сопровождающих градовые процессы гроз, ливневых осадков катастрофической интенсивности, паводков, селей, шквалов и смерчей. Они наносят серьезный ущерб сельскому хозяйству, флоре, фауне, строениям, транспортным средствам, линиям электроснабжения, связи и другим коммуникациям.

Наиболее градоопасным регионом Российской Федерации является Северный Кавказ. На территории Краснодарского и Ставропольского краев, а также республик Адыгея, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Северная Осетия-Алания, где осуществляется противоградовая защита (ПГЗ), по статистическим данным ежегодно от градобитий погибает 5–7%, а в отдельные годы до 15% урожая [2]. В последние годы отмечается тенденция нарастания градоопасности равнинных районов Северного Кавказа.

Согласно реестрам ВМО противоградовые работы выполняются более чем в 40 странах мира на площади порядка 96 миллионов гектар. Защита осуществляется путем засева градовых и градоопасных облаков льдообразующими реагентами с применением авиационного, артиллерийского, ракетного методов и метода наземных генераторов.

Эти методы отличаются по научным принципам и критериям засева, техническим средствам засева, расходу реагента, качеству реализации концепций засева и методам оценки эффективности. Поэтому эффективность ПГЗ в разных странах варьирует в широких пределах:

- ⇒ *авиационный метод* сокращает потери от града на 28-41% [2,16];
- ⇒ *артиллерийский метод* – на 70–80% [2];
- ⇒ *сеть из 660 наземных генераторов* кристаллизующего аэрозоля на юге Франции (проект ANELFA) сокращает потери от града в среднем за 50 лет на 41% [14];
- ⇒ *ракетный метод* в Болгарии, Сербии, Китае – на 50–70% [2,12];

⇒ *российская автоматизированная ракетная технология* – в среднем за период 2001–2013 гг. на 87% [2,10].

Физической основой российской автоматизированной ракетной технологии ПГЗ является принцип ускорения осадкообразования из областей будущего градообразования путем создания столь высокой начальной концентрации кристаллов (порядка $5 \cdot 10^{10} - 10^{11} \text{ м}^{-3}$), которая неизбежно ведет к их агрегации, обзернению агрегатов кристаллов облачными каплями и формированию гигантских концентраций снежной крупы. Выпадение этой крупы может привести к подавлению слабых восходящих потоков за счет динамического торможения и снижения их плавучести за счет выхолаживания при таянии крупы ниже уровня изотермы 0°C . Следует отметить, что все другие известные принципы воздействия на градовые процессы (рис.1), кроме принципа полной кристаллизации объема градообразования, являются частным случаем принципа ускорения осадкообразования:

- создание высокой концентрации искусственной крупы до зарождения естественных зародышей града может наилучшим образом способствовать их конкуренции за жидкокапельную влагу по Г.К. Сулаквелидзе [6];

- это же обеспечивает вымывание и обеднение облачной воды в областях роста града, которое предусматривалось методом укрупнения капель с последующим замораживанием по Бартишвили и др. [7];

- преждевременное выпадение осадков может привести к динамическим эффектам подавления восходящих потоков по Вульфсону и Левину [8] за счет создания импульса нисходящих потоков, уменьшения плавучести восходящих потоков при таянии крупы в теплой части атмосферы. При этом динамические эффекты могут значительно превышать эффекты, полученные при сбросе упаковок цемента, которые по экспериментальным данным Корнеева и др. [9] эффективно разрушают мощно-кучевые облака.

- раннее укрупнение частиц может приводить к понижению траектории их роста по Браунингу и Футу [13];

- ранний засев и ускорение осадкообразования стимулируют динамические эффекты быстрого развития конвективных ячеек за счет высвобождения скрытой теплоты фазовых переходов и увеличения плавучести по Н. Orville [15] и J. Simpson [18].

В целях дальнейшего развития физических принципов воздействия на градовые процессы в ВГИ осуществляются фундаментальные теоретические, лабораторные и натурные исследования.

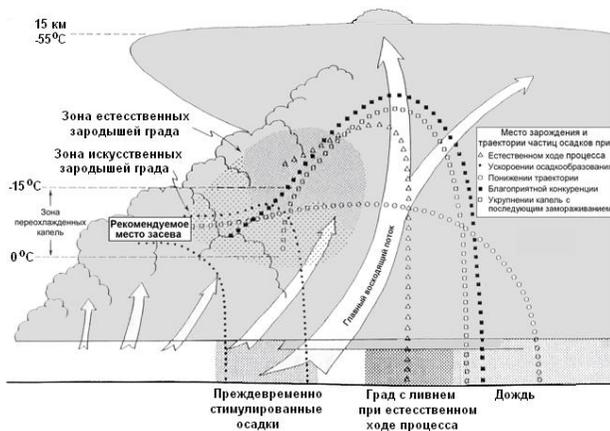


Рис. 1. Место зарождения и траекторий частиц осадков при естественном ходе градообразования и при реализации различных концепций воздействия [17].

Разработана теоретическая модель активного воздействия на градовые процессы с помощью кристаллизующего аэрозоля, исследованы закономерности его турбулентной диффузии и взаимодействия с облачной средой, оптимизированы дозировки, место и время внесения реагентов с помощью реальных противорадовых ракет и снарядов [3]. Создана трехмерная нестационарная модель градового облака с детальной микрофизикой, на базе которой осуществляются численные эксперименты по исследованию эволюции градовых облаков при естественном развитии и засеве ледяными частицами [5].

Российская автоматизированная ракетная технология ПГЗ [1] применяется в России, странах СНГ, проданы лицензии в Аргентину, Венгрию, Бразилию, а ее элементы, защищенные десятками патентов, применяются во многих других странах [2,10].

Противорадовая защита в Российской Федерации осуществляется Краснодарской, Ставропольской, Северо-Кавказской и Крымской Военизированными службами (ВС) по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы под *научно-методическим руководством* Высокогорного геофизического института Росгидромета, который ежегодно проводит курсы подготовки специалистов, инспекции ВС с рекомендациями по совершенствованию их оперативной деятельности, анализ случаев пропуска градобитий и аномального функционирования технических средств, принимает меры по устранению их причин, разрабатывает методы и техни-

ческие средства ПГЗ, а также руководящие документы (РД) по их применению.

Организация и проведение ПГЗ регламентируется следующими РД:

- РД 52.37.731-2010. Организация и проведение ПГЗ;
- Руководство по применению радиолокатора МРЛ-5;
- РД 52.37.732-2010. Методы оценки эффективности воздействия на градовые процессы и порядок отчетности о проведении ПГЗ;
- РД 52.37.672–2006 Методические указания. Экспресс оценка предотвращения ущерба в период противорадовой защиты;
- РД 52.37.601-2012. Наставление по ракетно-артиллерийскому обеспечению АВ на метеорологические и др. геофизические процессы;
- РД 52.37.710-2012. Порядок применения модернизированного противорадового комплекса «Алазань»;
- РД 52.37.615-2000. Инструкция. Порядок обеспечения безопасности работ по АВ на метеорологические процессы;
- РД 52.37.754–2011. Нормы времени и нормативы численности на выполнение работ по организации и проведению ПГЗ;
- Инструкции по организации и проведению противорадовых стрельб на территории Российской Федерации.

Физическая эффективность ПГЗ в Российской Федерации, в последние годы в среднем составляет около 87%, т.е. ущерб на защищаемой территории сокращается в 7,7 раза (рис.2а).

Экономический эффект повышается по мере повышения качества ПГЗ и стоимости агропромышленной продукции. В 2010–2013 гг. годовой экономический эффект (рис.2б) достиг 2,3–2,7 млрд. руб. (около 1000 руб./га при себестоимости ПГЗ, равной 160–200 руб./га. Затраты окупаются в среднем в 6-9 раз.

Примерно такая же эффективность ПГЗ достигается в странах СНГ (Украина, Молдавия, Таджикистан, Узбекистан) и Аргентине, применяющих российскую технологию ПГЗ на площади около 3,2 млн. га. Потери от града на защищаемых территориях (N_S) в странах СНГ имеют тенденцию сокращения (рис.3) по мере совершенствования техники, технологии и организации работ, в то время как на не защищаемых территориях отмечается тенденция роста этих потерь (N_C).

Наряду с этими успехами следует отметить, что при воздействии на мощные градовые процессы отмечаются случаи неудач и пропуска града на защищаемой территории. Это свидетельствует о необходимости дальней-

ших исследований градовых процессов, совершенствования технологии и технических средств ПГЗ.

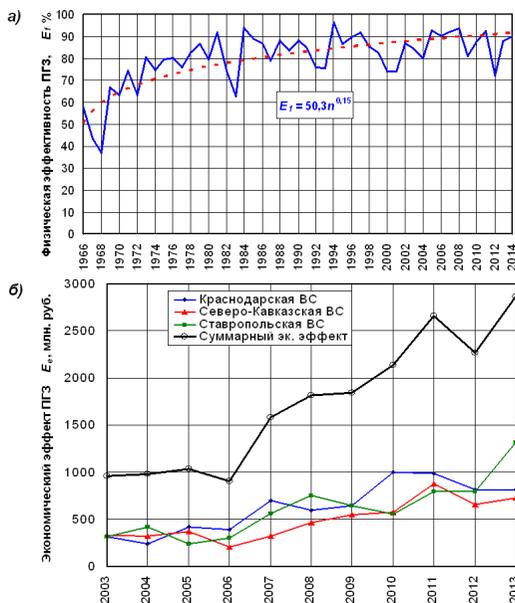


Рис.2. Физическая (а) и экономическая (б) эффективность ПГЗ в Российской Федерации.

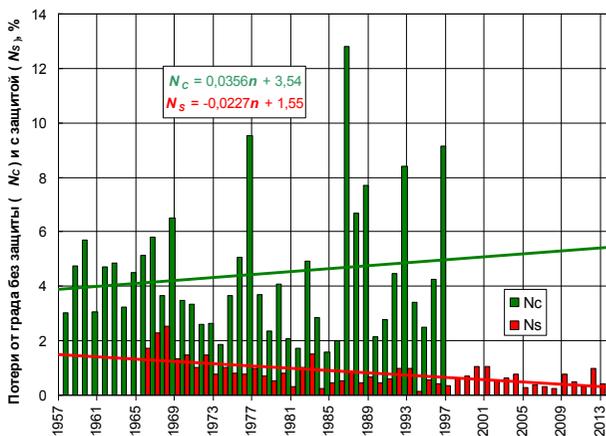


Рис.3. Потери от града в странах СНГ на защищаемы (N_s) и не защищаемых (N_c) территориях.

2. Перспективы развития

Основной проблемой противоградовых работ в России и странах СНГ является устаревшая техническая база, сдерживающая внедрение технологических достижений (новых критериев распознавания объектов воздействия (ОВ), новых схем их засева и т.д.), а также высокая себестоимость, сдерживающая расширение площадей защиты и экспорта системы ПГЗ.

2.1. Дальнейшее *повышение эффективности и снижение себестоимости ПГЗ* может быть достигнуто за счет модернизации системы ПГЗ на базе вновь созданных технических средств:

2.1.1. Программно-технический радиолокационный комплекс управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» версии 2013 (рис.4), который одновременно решает также задачи штормоповещения и метеобеспечения авиации, обеспечивает глубокую модернизацию и продление срока службы МРЛ-5, выработавших ресурсы [4].

2.1.2. Малогабаритные более эффективные противоградовые ракеты нового поколения «Алазань-9», «Ас» и «Алан-3» (рис.5а), имеющие повышенную эффективность, безопасность и меньшую себестоимость [11].

2.1.3. Автоматизированная ракетная пусковая установка «Элия-2» [11] с дистанционным беспроводным управлением (рис.5б), обеспечивающая требуемый по технологии темп засева, документирование даты, времени и координат пуска применяемых и вновь создаваемых ПГИ.

2.1.4. Программно-технический комплекс (ПТК) управления сетью удаленных ракетных установок «АСУ-Элия» [11].

2.1.5. Автоматизированная ракетная система ПГЗ «АСУ-Град» (рис.6), обеспечивающая реализацию малолюдной технологии ПГЗ [11], которая создана на базе перечисленных технических средств и проходит производственные испытания в Северо-Кавказской ВС.

2.1.6. Доплеровский радиолокатор 10 см диапазона «ДМРЛ-С» со встроенным программно-техническим комплексом управления противоградовыми операциями, разработку которого ОАО «Алмаз-Антей» планирует завершить в 2014 году на замену «МРЛ-5».

Таблица 1. Техническая оснащенность противоградовых служб в 2013 году.

Наименование ВС	Площадь ЗТ, тыс. га	Число КП, шт.	Число ПВ, шт.	Число технических средств, шт.		
				МРЛ-5	ракетных ПУ	радиостанций
Красно-	880,0	6	64	6	112	183

дарская						
Ставропольская	839,0	2	45	2	71	141
Северо-Кавказская	801,4	3	60	5	123	305
Всего:	2520,4	11	169	13	306	629

2.2. ПТК управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» успешно применяется во многих регионах и обеспечивает автоматический радиолокационный обзор, обнаружение и измерение параметров облаков, распознавание градовых облаков и категорий ОВ, локализацию места засева с учетом структуры ОВ, оптимальный выбор ракетных пунктов, выработку команд на ракетный засев, документирование параметров ОВ и материалов воздействия.

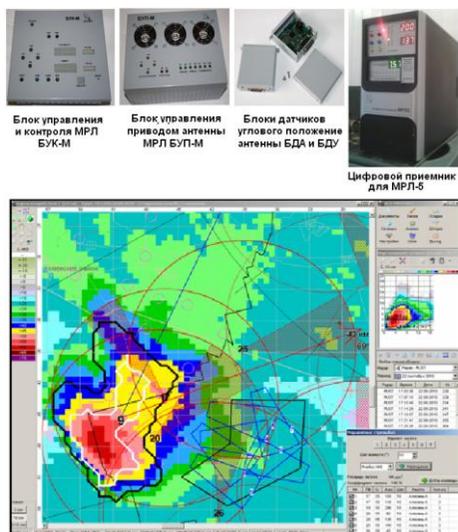


Рис.4. Аппаратура «АСУ-МРЛ» и фрагмент засева градового облака.

ПТК «АСУ-МРЛ» обеспечивает также автоматическое наведение антенны МРЛ на Солнце, проведение калибровки, ориентирования и горизонтирования МРЛ по радиоизлучению Солнца.

2.3. Малогабаритные противоградовые ракетные комплексы нового поколения созданы на основе следующих концепций и требований:

- повышение льдообразующей эффективности и эффективного радиуса действия противоградовых изделий (ПГИ);

- снижение себестоимости ПГИ и пусковых установок (ПУ);
- уменьшение габаритно-массовых характеристик ПГИ и ПУ;
- автоматизация противорадовых операций;
- повышение безопасности и экологической чистоты ПГИ.

В соответствии с этими требованиями в 2011 г. было завершено создание и проведены межведомственные испытания ПГИ нового поколения «Алазань-9», а в 2014 г. ПГИ «Ас» (рис.5). Их технические характеристики в сравнении с применяемым аналогом приведены в табл.2.

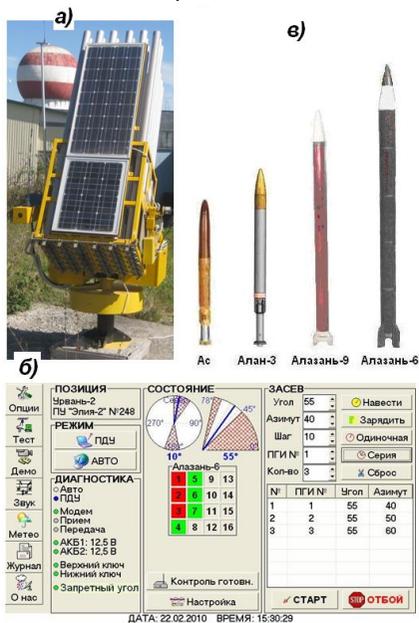


Рис.5. Автоматизированная ракетная установка «Элия-2» (а), панель управления ПУ «Элия-2» (б) и противораговые ракеты нового поколения (в).

Таблица 2. Основные технические характеристики ракеты ПГИ нового поколения «Алазань-9», «Ас» и применяемых ПГИ «Алазань-6».

Технические характеристики	Алазань-6	Алазань-9	Ас
Калибр, мм	82,5	60	57
Длина изделия, мм	1402	1342	650
Стартовая масса, кг	8,8	4,4	1,2

Эффективный радиус действия, км	10,5	9,7	11
Длина пути засева в 1 км слое, км	6,0	6,0	9,0
Масса реагента, г	660	400	820
Количество AgI, г	52,8	32,0	16,4
Выход льдообразующих частиц при температуре -10 °С и -6 °С, шт.	$6,6 \cdot 10^{15}$ $2 \cdot 10^{15}$	$6,6 \cdot 10^{15}$ $2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{16}$ $6 \cdot 10^{15}$
Система самоликвидации	взрывом	взрывом	без взрыва
Масса ВВ, кг	0,24	0,13	0,00
Надежность систем безопасности	0,995	0,9995	0,9995

2.4. Ракетные установки «Элия-МР», имеющая ручное управление, а также «Элия-2» (рис.5б), имеющая автоматизированное дистанционное управление и автономную систему электропитания от солнечных батарей [11], освоены в серийном производстве и осуществляется постепенная замена устаревших установок «ТКБ-040». Основные технические характеристики этих установок приведены в табл.3.

Таблица 3. Технические характеристики ракетных установок.

Параметры ПУ	ТКБ-040	Элия-МР	Элия-2
Калибр направляющих, мм	83	83, 61	83, 61, 57
Число направляющих, шт.	12	12	16, 24, 36
Масса с пультом управления, кг	670	340	180
Управление	Ручное	Ручное	Автомат
Скорострельность ракет/мин	6	6	15
Напряжение электропитания, В	24 ± 3	24 ± 3	24 ± 3

2.5. ПТК управления сетью удаленных ПУ «Элия-2» обеспечивает контроль их состояния (угловое положение, заряженность направляющих, заряженность аккумуляторных батарей); обмен данными между ПТК и ПУ

«Элия-2»; ориентирование и горизонтирование ПУ по Солнцу; наведение ПУ на углы заряжания и безопасный азимут; автоматическую передачу команд, наведение ПУ и пуск серии ПГИ; регистрацию количества, координат и времени пуска ПГИ, а также сбор данных с мини метеостанций, встроенных в ПУ «Элия-2» [11].

2.6. Внедрение перечисленных новшеств позволит модернизировать техническое оснащение противорадовых служб и создать автоматизированную ракетную систему ПГЗ «АСУ-Град» (рис.6) с реализацией малолюдной технологии (без постоянного обслуживающего персонала ракетных пунктов) и устранением субъективных ошибок.

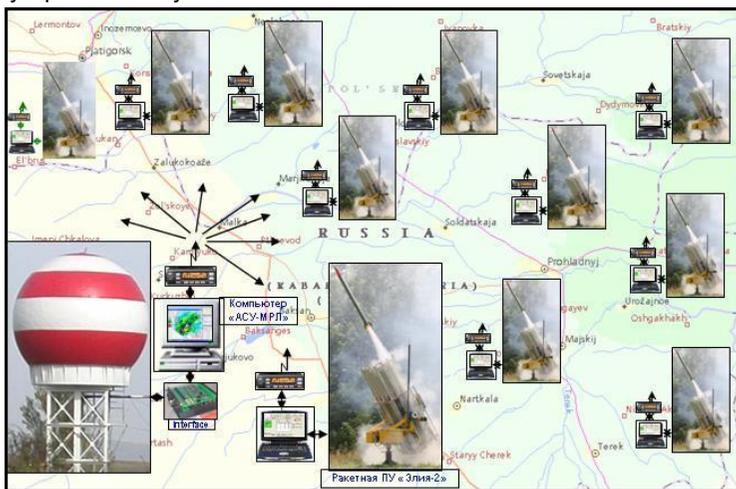


Рис. 6. Автоматизированная ракетная система противорадовой защиты «АСУ-Град».

Заключение

Анализ состояния и перспектив развития противорадовой защиты в Российской Федерации и странах СНГ с применением российской автоматизированной ракетной технологии показывает ее высокую эффективность и окупаемость, а также возможность дальнейшего совершенствования за счет технической модернизации системы ПГЗ на основе вновь созданных технических средств. Затраты на такую модернизацию составят около 25% от годовых затрат на проведение ПГЗ и могут многократно окупиться в течение одного сезона за счет повышения эффективности и снижения себестоимости защиты.

Список литературы

1. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М. Автоматизированный способ защиты от градобитий/Патент RU № 2369088 С2.Бюл. № 28, 10.10.2009.
2. Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. – Спб.: Гидрометеоиздат, 2006. 280 с.
3. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Жекамухов М.К. Моделирование ракетного засева градовых облаков // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий, Нальчик. 2011. С. 147-171.
4. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система обработки радиолокационная информации для целей штормооповещения и активного воздействия на облачные процессы // Сборник трудов XXVII Всерос. симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб. 2011. С. 211-225.
5. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Состояние и перспективы численного моделирования облачных процессов //Труды Межд. научной конф. «Инновационные методы и средства исследования в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь, 2013. – С. 11-17.
6. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 412 с.
7. Бартишвили И.Г., Бартишвили Г.С., Гудушаури Ш.Л., Ломинадзе В.П. К вопросу одновременного (комбинированного) воздействия на теплую и переохлажденную часть облака с целью предотвращения града // Труды Закавказского государственного университета, 1967. Вып. 2. С. 7-22.
8. Вульфсон Н.И., Левин Л.М. Разрушение развивающихся кучевых облаков с помощью взрывов.- Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. № 2. Т. 8. 1972. С. 156-166.
9. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков. – СПб. 2012. 341 с.
10. Abshaev M.T. Russian rocket technology: seeding concept, criteria of hail detection, seeding schemas, radar control, rocket systems, efficiency//Report No 6, WMO Meeting on Hail Suppression, Nalchik, 2003. – P. 91-98.
11. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Kuznetsov B.K., et all. New advances in automation of antihail rocket technology // 10th WMO Sci Conf. on Weather Modification – Bali, Indonesia. 2011. P. 202-224.
12. Boev P., Simeonov P. Hail suppression activities in Bulgaria // Report No 6, Meeting of experts on hail suppression. – Nalchik, 2003. P. 161-164.

13. Browning K. A. and Foote G. B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. Quart. J. Roy. Met. Soc. V. 102, 1976. – P. 499-533.

14. Dessens J., Berthet C., Sanchez J.L. Mitigation of hail damages by cloud seeding in France and Spain // 5th European Conference on Severe Storms, 2009. – Landshut, Germany. – P. 28-43.

15. Farley R.D., Wu Ting, Orville H.D., Hui Chen. The Numerical Simulation of Hail Suppression Experiments // Sixth WMO Sci. Conf. On Weather Modif. – Paestum, Italy, 1994. Vol. 1. P. 161-166.

16. Krauss T. Aircraft seeding technology and some outstanding issues of hail suppression//Report No 6, WMO Meeting on Hail Suppression, Nalchik, 2003. – P. 57-64.

17. Report of the Meeting of experts to review the present status of hail suppression. WMO. Weather Modification Program. Hail Suppression Research. Nalchik, Russia, 2003. – 140 p.

18. Simpson J, Brier J.M., Simpson R.H. Stormfury Cumulus Seeding Experiment 1965: Statistical analysis and main result//J. Atmos. Sci, 1967. Vol. 24. P. 508-521.

ПРИМЕНЕНИЕ РОССИЙСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УЩЕРБА ОТ АНОМАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ И ТЕХНОГЕННЫХ КАТАСТРОФ

В.П. Корнеев¹, Б.П. Колосков¹, Г.Г. Щукин², М.Т. Абшаев³, Б.Г. Данелян⁴

¹ АНО «Агентство атмосферных технологий», г. Москва

² Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

³ ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» г. Нальчик

⁴ ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» г. Долгопрудный

Введение

Аномальные погодные явления последних лет в России еще раз подтвердили зависимость экономики страны и жизни людей от природных явлений и глобального потепления климата, способствующего увеличению частоты стихийных явлений погоды, таких как катастрофические засухи и наводнения, аномальные снегопады, градобития, лесные и торфяные пожары, туманы в аэропортах и на автодорогах. От аномальных погодных явлений

страдают огромные территории, наносится ущерб экономике и окружающей среде, гибнут люди.

Не меньшую угрозу для экономики и жизни людей представляют техногенные катастрофы. К ним, в первую очередь, относятся аварии на химических предприятиях (по данным статистики в мире происходит до 20 аварий в год), а также аварии на атомных станциях. Аварии на Чернобыльской атомной станции и на атомной станции «Фукусима» еще раз напомнили всем, к каким катастрофическим последствиям может привести нарушение техники безопасности в атомной промышленности.

Все это острее ставит вопрос организации системного подхода к проблемам метеорологической безопасности страны.

1. Предпосылки для создания в России системы метеорологической защиты от аномальных погодных явлений

В результате многолетних исследований институтами Госкомгидромета СССР были созданы и успешно используются в оперативно-производственных работах современные технологии активного воздействия на гидрометеорологические процессы и явления с целью:

- искусственного увеличения атмосферных осадков;
- искусственного уменьшения атмосферных осадков;
- предотвращения (или уменьшения) выпадения града;
- рассеяния переохлажденных туманов.

В результате многолетних исследований разработана нормативная база проведения работ по активным воздействиям на градовые процессы, по искусственному увеличению атмосферных осадков самолетными методами, по искусственному регулированию погодных условий в мегаполисах, по рассеянию переохлажденных туманов, по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от пожаров. Исследованы экологические аспекты производственных работ по активному воздействию на гидрометеорологические процессы и явления.

Совместно с предприятиями промышленности (без бюджетного финансирования) разработаны новые самолетные и наземные технические средства активного воздействия на облака: пиропатроны «ПВ-26-01», самолетные аэрозольные генераторы «САГ-ПМ», «САГ-26» с льдообразующим пиротехническим составом «АД-1» (с 8% содержанием AgI), новые противорадовые ракеты «Алазань-6», «Алазань-9» и «Ас», новые ракетные установки с автоматизированным управлением «Элия-2» и ручным управлением «Элия-МР», наземные пиротехнические и азотные генераторы. Создана и внедрена в практику противорадовых работ автоматизированная технология противорадовой защиты, радиолокационная система управления противорадовы-

ми операциями «АСУ-МРЛ», действующий образец автоматизированной ракетной системы противорадовой защиты «АСУ-Град», который проходит производственные испытания, созданы также центры сбора и обработки радиолокационной, грозопелегационной и другой информации, позволяющие осуществлять управление противорадовыми операциями на больших площадях.

Созданы система радиообмена данными «земля-борт-земля», мобильный пункт управления работами по активному воздействию на облака на базе малогабаритного метеорологического радиолокатора «КОНТУР-МЕТЕО».

Накоплен опыт оборудования самолетов Су-30, Ан-12, Ил-18, Ан-26, Ан-30, М-101Т «Гжель» и Ан-28 средствами воздействия на облака и измерительно-вычислительным оборудованием и их использования в работах по воздействиям на облака.

Созданы технические средства рассеяния переохлажденных туманов и система управления ими, накоплен опыт проведения оперативных работ по рассеянию переохлажденных туманов в аэропортах и на автотрассах в России, Молдавии, Казахстане, Италии.

1.1. Российская технология противорадовой защиты

Первые работы по изучению градовых процессов в СССР были начаты в 50-х годах прошлого века на Кавказе. В 1956 г. академиком Е.К. Федоровым была поставлена задача разработки методов предотвращения града и были начаты комплексные исследования в целом ряде институтов Гидрометслужбы СССР. В 1964 г. были созданы Кавказская противорадовая экспедиция ВГИ и Молдавская противорадовая экспедиция ЦАО, а с 1967 г. в СССР начато производственное применение методов противорадовой защиты на больших территориях и созданы военизированные службы практически во всех южных республиках СССР. Дальнейшее оформление унифицированной ракетно-артиллерийской технологии противорадовой защиты получила в 1980-1986 гг. в Научно-производственном центре противорадовой защиты (НПЦ ПГЗ) ВГИ. К 1989 г. площадь противорадовой защиты в СССР достигла 11,5 млн. га, однако произошедший развал СССР привел к прекращению этих работ в Грузии, Азербайджане, Таджикистане и сокращению работ в Молдавии и на Украине [1].

В настоящее время в России существует четыре Военизированные службы по активным воздействиям на гидрометеорологические и другие геофизические процессы, осуществляющие производственные работы по защите от града и снежных лавин.

Общая площадь защищаемой от града территории составляет 2,6 млн. га, создана нормативно-техническая база, проводятся ежегодные курсы подготовки специалистов в области противорадовой защиты, подготовлена техническая база для перевооружения противорадовых служб на новые современные программно-технические средства:

- автоматизированная система управления противорадовыми операциями «АСУ-МРЛ»;
- противораговые установки «Элия-2» и «Элия-МР» взамен морально и физически устаревших установок «ТКБ-040»;
- автоматизированная система беспроводного управления сетью удаленных ракетных установок;
- малогабаритные противораговые ракеты нового поколения «Алазань-9» и «Ас».

Многолетний опыт применения российской технологии противорадовой защиты в РФ, странах СНГ и ряде других стран показал, что данная технология обеспечивает сокращение потерь от града на 85–90% (в 7–10 раз). Годовой экономический эффект противорадовых работ на Северном Кавказе превышает 2,5 миллиарда рублей. Затраты на их проведение окупаются в 6–9 раз.

1.2. Российская технология искусственного регулирования атмосферных осадков

В 70-90-е годы прошлого века российская технология регулирования атмосферных осадков прошла многолетнюю отработку на метеорологических полигонах в различных климатических зонах. Знаковым для внедрения этой технологии в оперативно-производственные работы стал 1986 год: именно в этот год начаты масштабные оперативно-производственные работы по ИУО в Ставропольском крае, а авария на Чернобыльской атомной электростанции в апреле 1986 г., явилась тем фактором, который положил начало оперативным работам по предотвращению или уменьшению осадков с целью ликвидации последствий техногенных катастроф. В дальнейшем технологии предотвращения (уменьшения) осадков успешно применялись в России, Казахстане и Узбекистане в работах по метеозащите мегаполисов с целью улучшения погодных условий во время проведения политических, культурных и спортивных мероприятий и, начиная с 1995 г. по настоящее время проведено уже более 60 таких работ.

В этот же период технология ИУО эффективно использовалась в работах по увеличению осадков в России (Республика Саха (Якутия)), на Кубе, в Португалии, Сирии и Иране [2,3].

В процессе выполнения этих проектов совершенствовалась технология ИРО, был накоплен огромный опыт организации крупномасштабных авиационных работ по воздействию на облака, совершенствовались самолетные технические средства воздействия и измерительная аппаратура, была создана система передачи данных «земля-борт-земля», позволившая осуществлять оперативный контроль и управление авиационными работами. За этот период для работ по регулированию осадков оборудовано более 20 самолетов различных типов.

В 2013 году Росгидрометом завершено оборудование самолета-лаборатории нового поколения Як-42 «Росгидромет», позволяющего решать широкий спектр научных и прикладных задач геофизического мониторинга, включая мониторинг распространения продуктов природных и техногенных катастроф, исследования физики облаков, динамики атмосферы и активные воздействия.

Более чем полувековой опыт исследовательских и оперативно-производственных работ по ИРО в Советском Союзе и Российской Федерации позволил определить границы созданных технологий. Так, например, технология искусственного увеличения осадков позволяет увеличить осадки из отдельных облаков на 80-100% и дополнить на 10-30% сезонный слой осадков на значительных территориях. Это подтверждается работами зарубежных ученых.

Анализ результатов более чем 60 крупномасштабных работ по созданию благоприятных погодных условий, выполненных в различных регионах России и ближнего зарубежья, показывает, что российская технология искусственного уменьшения осадков приводит к существенному (в 3–10 раз) уменьшению количества осадков на защищаемой территории [3].

2. Рассеяние переохлажденных туманов

С конца 80-х годов прошлого века в нашей стране ведутся оперативные работы по рассеянию переохлажденных туманов.

В период с 1988 по 1993 год проводились опытно-производственные работы по рассеиванию переохлажденных туманов в аэропортах Кишинева, Алма-Аты и Шереметьево (Москва), в ходе которых отработывалась методика практического использования жидко-азотных генераторов.

В 1995-2001 годы российскими специалистами совместно с итальянскими фирмами «Технагро» и «Аутове Венете» проводились работы по усовершенствованию технических средств воздействия жидким азотом и разработке методики их использования в стационарном и мобильном вариантах применительно к аэропортам и автострадам.

Опытно-производственные работы по рассеиванию переохлажденных туманов в аэропорту Алма-Аты продолжены в зимнем сезоне 2002-2003 годов. Общая продолжительность работ с переохлажденными туманами за 29 дней составила 119 час 25 мин. Средняя продолжительность туманов составила 4–7 часов, и в четырех случаях превышала 8 часов. Воздействия проводились при температурах от 0 до -16,4°C. Начальная метеорологическая дальность видимости была в большинстве случаев менее 100м. По отчетным данным Заказчика о прилетах и вылетах воздушных судов за период работ в дни с холодными туманами за счет искусственного рассеивания туманов на аэродроме Алма-Аты был обеспечен прием 98 и выпуск 118 самолетов [3].

Опыт работ, проведенных в России, Казахстане и Италии, подтвердил эффективность использования российской технологии рассеивания переохлажденных туманов с использованием жидкого азота в аэропортах и на автомагистралях.

Заключение

Система метеорологической защиты России предназначена для оперативного противодействия аномальным погодным явлениям, таким как град, катастрофические ливни и снегопады, засуха, лесные пожары, туманы, а также для снижения ущерба от техногенных катастроф (аварии на АЭС и химических предприятиях), связанного с выбросом в атмосферу радиоактивных и вредных химических веществ.

Создаваемая система предполагает использование уже имеющихся в России наземных и авиационных средств активного воздействия на облака и создание в стране инфраструктуры для обеспечения быстрого реагирования при возникновении опасных метеоявлений, а также при угрозах техногенного характера, возникающих в атмосфере.

Для этого потребуются осуществить комплекс следующих мероприятий:

- разработать документы, определяющие порядок взаимодействия Росгидромета, МЧС РФ, ВВС РФ, Росавиации, ГК «Ростехнологии», федеральных и региональных органов управления и авиапредприятий при возникновении в России угроз климатического и техногенного характера, требующих проведения работ по активному воздействию на гидрометеорологические процессы;
- создать систему управления работами по воздействию на гидрометеорологические процессы;
- создать региональные центры с мобильными пунктами управления работами по воздействию на облака, оборудованные средствами телефонной

и радиосвязи, необходимой оргтехники и располагающие базами для хранения средств воздействия и реагентов;

- определить порядок использования самолетов различных ведомств, оборудованных специальной метеорологической аппаратурой и средствами активного воздействия, включая самолеты ВВС МО РФ, МЧС РФ, экспериментальной авиации при возникновении в России угроз климатического и техногенного характера;

- продолжить исследования с целью совершенствования технологий активного воздействия и создания новых технических средств и реагентов;

- разработать программу подготовки специалистов в области активного воздействия.

Список литературы

1. Абшаев М.Т. Этапы развития и основные положения современной ракетной технологии противорадиолокационной защиты//Тр. науч.-практ. конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от радиолокационных ударов. - Нальчик, 2007.- Нальчик: Издательство «Прогресс», 2011. С.11-29.

2. Берюлев Г.П., Беляев В.П., Данелян Б.Г., Колосков Б.П., Черников А.А. Основные результаты экспериментов по увеличению осадков из конвективных облаков на Кубе//Тр. ЦАО, 1996. Вып. 181. - С.52-60.

3. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. - С-Пб.: РГГМУ, 2012.- 341 с.

4. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Петров В.В., Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Щукин Г.Г. Оценка результатов работ по метеозащите крупных городов//Метеорология и гидрология. 2011. № 2. С. 66-73.

ЧИСЛЕННАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ КУЧЕВО-ДОЖДЕВОГО ГРОЗОВОГО ОБЛАКА

Ю.А. Довгалюк¹, Н.Е. Веремей¹, С.А. Владимиров³, А.С. Дрофа⁴, М.А. Затевахин⁵, А.А. Игнатьев⁵, В.Н. Морозов¹, Р.С. Пастушков³, А.А. Синькевич¹, А.В. Шаповалов²

¹ФГБУ «ГТО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

²ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

³ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный

⁴ФГБУ «НПО «Тайфун»», г. Обнинск

Введение

В настоящее время силами четырех институтов Росгидромета (ФГБУ «ГГО», ФГБУ «ЦАО», ФГБУ «ВГИ», ФГБУ «НПО «Тайфун»») ведется усовершенствование разработанной ранее численной нестационарной трехмерной модели осадкообразующего кучево-дождевого грозового облака. Головной организацией является ФГБУ «ГГО».

В период 2008-2010 гг. была выполнена работа по созданию отечественной трехмерной нестационарной модели осадкообразующего конвективного облака с параметризованным описанием микрофизических процессов [2,3]. Модель позволяет исследовать эволюцию конвективного облака как при естественном развитии, так и при активном воздействии (АВ), и проводить оценку эффекта АВ.

Далее, в период 2011-2013 гг., работы в данном направлении были продолжены: на основе указанной модели создана трехмерная модель грозового кучево-дождевого облака.

Базовая часть модели, описывающая эволюцию грозового облака в естественном цикле, разработана ФГБУ «ГГО», а блоки, описывающие АВ, – соисполнителями. ФГБУ «ВГИ» разработал блок воздействия льдообразующим реагентом, ФГБУ «НПО «Тайфун»» – гигроскопическим реагентом, ФГБУ «ЦАО» – блок АВ с использованием обоих видов реагентов. Разработана схема стыковки блоков с базовой моделью таким образом, чтобы каждый из этих блоков мог автономно подключаться к модели либо отключаться от нее.

1. Стыковка базовой модели с блоками активных воздействий

Разработка полной трехмерной нестационарной модели осадкообразующего конвективного облака, пригодной в практике активных воздействий, включает два основных этапа: создание базовой модели, описывающей эволюцию облака в естественном цикле; подключение к ней блоков, описывающих АВ на облако с поставленной целью.

Базовая модель создана в ФГБУ «ГГО». Ее детальное описание приведено в работах [1,2]. Остановимся подробнее на втором этапе.

Разработана схема стыковки с базовой моделью блоков АВ, созданных разными исполнителями (рис.1). Уточнен набор физических величин, которыми базовая модель обменивается с соответствующими блоками. Каждый из независимо разрабатываемых блоков АВ может подключаться к базовой модели или отключаться от нее. После задания исходных данных на каждом

шаге по времени эти данные обрабатываются базовой моделью, что соответствует случаю естественной эволюции облака.

Далее обработка данных может либо продолжаться с использованием одного из блоков АВ (по выбору пользователя), либо миновать их все (если моделируется естественная эволюция облака и АВ не рассматривается). На схеме (рис.1) это проиллюстрировано в виде системы ключей.

Все способы АВ, на данный момент применяемые в модели, являются микрофизическими, т.е. связаны с фазовыми переходами влаги и (или) процессами коагуляции. Таким образом, динамический блок, описывающий динамику воздушных потоков и перенос облачных частиц, целиком относится к базовой модели. Стыковка реализуется на уровне микрофизического блока.

В выбранный блок АВ, реализованный в виде подпрограммы, подается необходимая информация о пространственных полях тех или иных величин (водность, ледность, температура и др.).

Дополнительно указывается область и промежуток времени, когда производится воздействие, а также количественные характеристики воздействия (активность реагента, его расход или эффективное изменение тех или иных параметров). Выбор указанной области осуществляется в зависимости от активности реагента.

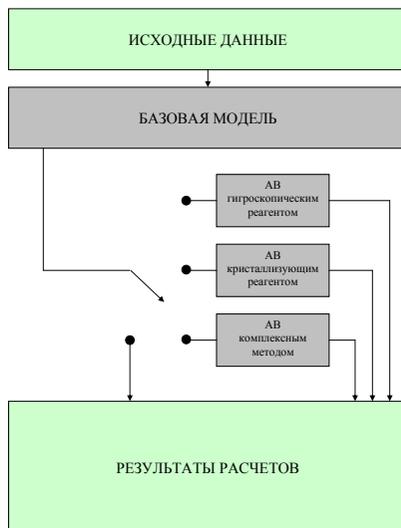


Рис.1. Схема стыковки блоков активных воздействий с базовой моделью конвективно-годового грозового облака

Ниже представлены примеры результатов численных экспериментов по моделированию активных воздействий на облако, выполненных разными исполнителями.

2. Моделирование активного воздействия гигроскопическими и льдообразующими реагентами по методике ЦАО

Разработанный в ЦАО блок программ по расчёту активных воздействий на конвективную облачность гигроскопическими и льдообразующими реагентами предусматривает работу с ним в следующих режимах: расчет АВ гигроскопическим реагентом в заданной области с заданного момента времени; расчёт АВ гигроскопическим реагентом в заданную область нижней границы облака при дальнейшем сохранении изменения параметров автоконверсии в данном облачном объеме; расчет АВ льдообразующим реагентом с использованием концепции мгновенного замерзания задаваемой части жидкокапельной влаги; расчет АВ, когда в заданной области в заданный момент воздействия вводятся льдообразующие ядра-кристаллы заданной концентрации и перегонка с ОК на ЛК вычисляется по общим выражениям модели; расчет комбинированного АВ гигроскопическим и льдообразующим реагентами с использованием приведённых выше подходов 1 и 3; расчет комбинированного АВ гигроскопическим и льдообразующим реагентами с использованием приведённых выше подходов 2 и 4.

При этом учет активации ядер конденсации в базовой трехмерной модели с использованием соответствующего блока на этапе использования параметризации типа Кесслера состоит в выделении четырех режимов формирования облачных капель в зависимости от аэрозольного состояния атмосферы. Первый режим (морской) реализуется при концентрации капель, формируемых в основании облака, менее 100 см^{-3} . Второй режим (экстраконтинентальный) реализуется при концентрации капель более 1000 см^{-3} . Два последующих режима занимают промежуточное положение. Эта концентрация вычислялась с помощью блока программ по расчёту активации ядер конденсации. Было получено, что в конвективном облаке с восходящими скоростями более 1 м/с она определяется главным образом концентрацией ОЯК и может быть оценена параметром С1 (концентрация активных ОЯК при 1% пересыщении).

По данным измерений спектров ОЯК по пересыщениям, проведенных в ЦАО в районе города Долгопрудный Московской области, параметр С1 имел величину $600\text{-}700 \text{ см}^{-3}$. При поступлении в атмосферу частиц продуктов горения от пожаров, имевших место в Московской области, он увеличивался и превышал 1000 см^{-3} (а в 2010 г. и 2000 см^{-3}). Для каждого из этих режимов уста-

навливаются свои параметры параметризации Кесслера (скорость автоконверсии и порог ее возникновения).

Значения этих параметров оцениваются на основе моделирования эволюции спектра размеров капель с помощью лагранжевой модели поднимающегося облачного объема. Эксперименты с различными концентрациями ОЯК в атмосфере показали зависимость выпавших осадков от этих параметров. В нашем варианте модели АВ гигроскопическим реагентом с использованием концепции Кесслера установлено изменение параметров автоконверсии в области воздействия до наиболее благоприятных морских значений.

На рис.2,3 приведены некоторые из полученных результатов. За основные параметры, характеризующие развитие облачной конвекции как при естественных условиях, так и при АВ по первой из упомянутых моделей, были приняты интенсивность осадков, их продолжительность и общее количество. Полученный эффект АВ, измеренный, например, по количеству осадков, как видно, может составить 20–30%.

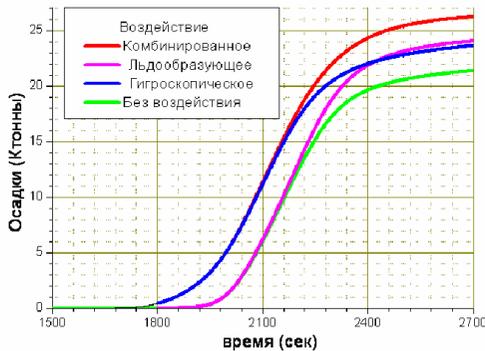


Рис.2. Пример расчёта общего количества конвективных осадков при естественном развитии конвекции (зеленая линия) и при трёх видах активного воздействия: гигроскопическим веществом (синяя линия), льдообразующим (лиловая линия) и комбинированным методом (красная линия). Версии параметризации АВ 1,3 и 5.

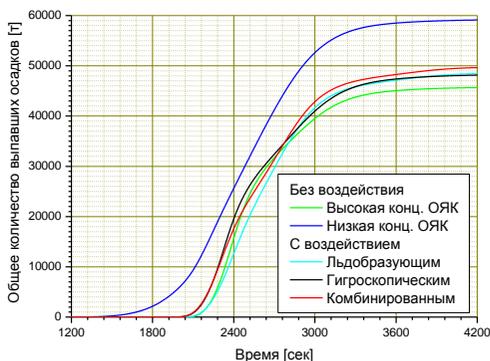


Рис.3. Эволюция общего количества выпавших жидких осадков в серии экспериментов по моделированию различных видов АВ гигроскопическими и льдообразующими реагентами на облако (естественное развитие: зеленые линии – в условиях повышенной фоновой концентрации ОЯК, синие – пониженной; АВ в условиях повышенной фоновой концентрации ОЯК: черные – гигроскопическими реагентами, голубые – льдообразующими, красные комбинированно). Версии параметризации АВ 2,4,6.

2. Моделирование активного воздействия гигроскопическими реагентами по методике НПО «Тайфун»

Одной из основных областей применения разработанной трехмерной численной модели конвективного облака является исследование эффекта воздействия на облако гигроскопическими реагентами с целью получения дополнительных осадков.

Концепция воздействия гигроскопическими частицами состоит в трансформации спектра облачных капель на начальной стадии конденсации таким образом, чтобы интенсифицировать коагуляционные процессы в облаке и ускорить процессы осадкообразования.

Моделирование воздействия гигроскопическими реагентами в трехмерной модели заключается в том, что в области облака, где находятся гигроскопические частицы, процесс осадкообразования описывается формулой Кесслера с параметрами автоконверсии, отличающимися по величине от параметров в фоновой облачной среде [1].

С использованием трехмерной модели проведены исследования эффекта воздействия на конвективные облака полидисперсным солевым порошком, разработанным в ФГБУ «НПО «Тайфун» [4].

Инициализация конвекции задавалась величиной теплового потока начального перегрева при заданной стратификации температуры и влажности

в атмосфере. Расчеты проводились для облаков, не дающих осадков, а также с осадками в виде дождя и града.

При моделировании воздействия соевым порошком ввод реагента производится в слой толщиной 200 м в основании формирующегося облака. Горизонтальные размеры области воздействия варьировались в пределах от 400 до 2000 м.

Как показали результаты расчетов, воздействие соевым порошком приводит к увеличению осадков из облака и более раннему их выпадению. С увеличением массы вводимого реагента интенсивность осадков и их суммарное количество возрастает до определенного предела. При массе реагента более 24 кг дальнейшее увеличение количества введенного порошка не приводит к существенному увеличению осадков.

Результаты расчетов эффекта воздействия соевым порошком на облака различной мощности показаны в таблице, где приведены суммарные осадки из облаков без воздействия и при воздействии соевым порошком с расходом 24 кг. Из таблицы видно, что при одинаковых расходах реагента эффект воздействия (получение дополнительного количества воды) возрастает при воздействии на облака большей мощности. При воздействии на смешанное облако мощностью 4,7 км возрастает также количество выпавшего града. Приведенные данные демонстрируют также возможность получения осадков из конвективных облаков небольшой мощности, из которых в обычных условиях они не выпадают.

Таблица. Суммарные осадки из облаков без воздействия и при воздействии соевым порошком.

Мощность облака	3,2 км		4,2 км		4,7 км	
	без воздействия	воздействие	без воздействия	воздействие	без воздействия	воздействие
Осадки, мм	–	1,8	2,9	6,9	4,6	9,0
Вода, тыс. т	–	1,9	7,3	13,9	18,7	26,3
Град, мм	–	–	–	–	0,1	0,34
Площадь выпадения, км ²	–	10,0	16,0	18,0	25,6	27,9

Результаты численного моделирования показали, что оптимальное время для введения реагента в облако – 15 мин после начала его формирования. При отклонении времени ввода реагента в облако от оптимального на 5 мин (опережения или запаздывания) эффект воздействия значительно уменьшается. При расходах порошка более 24 кг на облако наибольший положительный эффект воздействия (наибольшее количество дополнительных осадков) реализуется при засеве основания облака порошком на площади порядка 1 км^2 , совпадающей с областью восходящих воздушных потоков на нижней границе облака.

Результаты расчетов по трехмерной модели хорошо согласуются с результатами численного моделирования воздействия гигроскопическими реагентами на теплые конвективные облака, полученными ранее другими исследователями с использованием численных моделей с детальной микрофизикой. По результатам расчетов можно заключить, что использование трехмерной численной модели конвективного облака позволяет исследовать основные закономерности эффекта воздействия гигроскопическими реагентами на конвективное облако и получать рекомендации по методике проведения воздействия в природных условиях.

3. Моделирование активного воздействия льдообразующими реагентами по методике ВГИ

В ВГИ разработаны параметризации, позволяющие моделировать активное воздействие на конвективное облако с целью искусственного усиления осадков. Блок активного воздействия описывает источник в атмосфере на температурном уровне с эффективной льдообразующей активностью реагента. Площадка воздействия находится внутри облака. При моделировании АВ в программе задаются: граничные координаты площадки АВ в облаке по координатам X, Y, Z , мощность источника искусственных кристаллов, момент АВ.

На рис.4 представлены в трехмерном виде результаты моделирования конвективного облака на 20-й минуте эволюции при естественном ходе (а) и АВ (б). Голубая изоповерхность в центре облака представляет собой поверхность со значением вертикальной скорости 5 м/с. Множество изолиний вокруг восходящего потока отображает состояние массовой доли облачных капель Q_c . Массовая доля облачных кристаллов Q_{ic} на данный момент времени при естественном развитии облака (рис.4а) равна нулю.

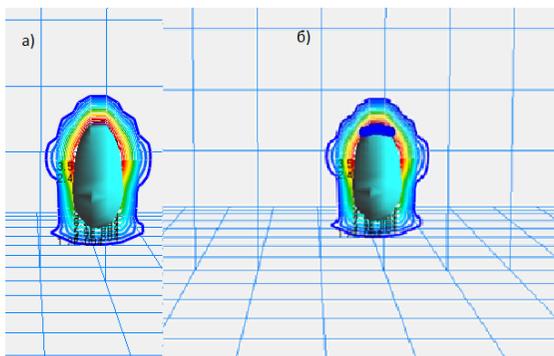


Рис.4. Параметры облака при естественном развитии (а) и АВ (б) в момент времени $t = 20$ МИН . АВ льдообразующим реагентом промоделировано на 15-й мин развития облака. В результате АВ в облаке к 20-й мин появляется облачный лед, чего не наблюдается при естественной эволюции (а).

На рис. 4б представлены также результаты моделирования облака на 20-й мин развития при АВ (начало на 15-й мин). В области засева появились искусственные облачные ледяные частицы (Q_{ic}). В результате аккреции с облачными каплями Q_{ic} со временем возрастает. На 20-й мин (через 5 мин после АВ) оно составляло 3,5 г/кг (максимальное значение). На рис.4б приведена изоповерхность облачных ледяных кристаллов $Q_{ic} = 1$ Г/КГ (синий объем над восходящим потоком).

Разработанная модель позволяет варьировать следующие параметры АВ: форму источника, его интенсивность, время АВ. Результаты расчетов по анализу влияния источника искусственных кристаллов на эволюцию облака будут зависеть от перечисленных параметров.

Заключение

Разработана отечественная трехмерная нестационарная модели осадкообразующего конвективного облака с параметризованным описанием микрофизических процессов. Модель позволяет исследовать эволюцию конвективного облака как при естественном развитии, так и при АВ, и проводить оценку эффекта АВ.

Разработана система блоков, описывающих широкий спектр микрофизических процессов в облаке (фазовые переходы и коагуляция) при АВ льдообразующими и гигроскопическими реагентами, а также комплексным

способом. Эти блоки могут независимо друг от друга подключаться к базовой модели, описывающей естественную эволюцию облака.

Численные эксперименты по АВ различными реагентами, выполненные разными соисполнителями по различным методикам, показали, что модель чувствительна к эффекту АВ.

Список литературы

1.Беляева М.В., Дрофа А.С. Численное моделирование конвективного облака с параметризованным описанием микрофизики//Тезисы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 24-28 октября 2011. - С.12-15.

2.Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров А.С., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I: Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока//Тр. ГГО. 2008. Вып. 558. С.102–142.

3.Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II: Микрофизический блок модели // Тр. ГГО. 2010. Вып. 562. С.7–39.

4.Дрофа А.С., Ераньков В.Г., Иванов В.Н., Шилин А.Г., Яскевич Г.Ф. Экспериментальные исследования эффективности воздействия солевыми порошками на конвективное облако для увеличения осадков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т.49, №3. С.327-335.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ГРАДА ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ РАЗВИТИИ ОБЛАКОВ И АКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С ЦЕЛЬЮ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Развитие физики градовых облаков на разных этапах различалось решаемыми задачами и используемыми для этой цели методами. К важнейшим задачам первого этапа ее развития можно отнести исследование «элементарных» процессов, способствующих формированию макро- и микроструктурных характеристик облаков и, следует отметить, в этом направлении получены существенные результаты. В частности, на основе лабораторных и теоретических исследований были изучены основные процессы, способствующие образованию и росту частиц осадков в облаках, формированию их микроструктуры. Из достаточно широкого перечня работ, в которых исследовались микрофизические процессы в облаках, можно отметить [7,15,16,23,25,26,28,29]. Результаты этих исследований широко используются в численных моделях облаков.

Другим направлением исследований является изучение огромного экспериментального материала, полученного в результате анализа проб градин из градовых процессов разной интенсивности, из разных частей градовых дорожек, с помощью известных и специально разработанных методик по особенностям кристаллического строения, пузырьковой структуры, аэрозольному, элементному и изотопному составу градин [12]. В результате получена определенная информация об особенностях механизма формирования градовых частиц в облаках различных типов. Исследования пузырьковой структуры капельных зародышей града показали, что наиболее вероятный температурный интервал их возникновения примерно в 70% случаев составляет $-6\div-12$ °С. Установлено, что капельные и крупяные зародыши имеют различный элементный состав. Крупяные зародыши, вероятнее всего, образуются в мелкокапельной среде, в относительно слабых восходящих потоках, в среде, в которую вовлекается воздух с более высоких околооблачных уровней с содержанием высокодисперсного аэрозоля, а капельные зародыши и слои мокрого роста формируются при более высокой температуре, чем крупяные зародыши и слои сухого роста. Анализ полученных результатов позволил разработать гипотезы образования и роста града в градовых облаках разного типа [12,14,22].

Важнейшим направлением являются натурные исследования градовых облаков, проводимые с 60-х годов прошлого столетия с использованием метеорадиолокаторов и самолетов-лабораторий, а также их численное моделирование. В результате накоплен большой материал о структуре вертикальных потоков [1,2,4,8,14,17-22,24,27,30]. Были предприняты попытки исследования формирования полей воздушных потоков и возможного их влияния на процессы осадкообразования в мощных конвективных облаках [4,17,18,20]. Но при этом влияние этих потоков на процессы образования и развития конвективных облаков рассматривалось без учета их взаимосвязи с другими процессами.

Это относится, например, и к исследованиям возмущений температуры ΔT внутри и в окрестности этих облаков, которые возникают под влиянием воздушных потоков и фазовых переходов воды, т.е. взаимодействия динамических, термодинамических и микрофизических процессов в облаке [10,14,19]. Показано, что поле ΔT носит чрезвычайно сложный характер и зависит оно от стадии развития облака, от характеристик облака и атмосферы, а максимальные значения ΔT в облаке и его окрестности достаточно хорошо коррелируют с максимальными значениями скорости вертикальных потоков. Отметим, что исследования облаков в этом направлении имеют важную особенность, которая заключается в игнорировании их системных свойств.

Результаты, полученные по этим направлениям, послужили основой различных представлений об образовании и развитии облаков, а также ряда концепций активного воздействия на процессы градообразования. Но, несмотря на полученные результаты, наши знания по физике градовых облаков и активных воздействий на них остаются пока еще существенно ограниченными, установление закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик градовых облаков требует дальнейших исследований. Этим можно объяснить существование различных теорий облакообразования и различных концепций активного воздействия на них.

Следующий этап развития физики градовых облаков и активных воздействий на них будет связан с изучением облаков с учетом их системных свойств. На этом этапе на передний план выходят такие задачи, как исследование роли взаимодействия процессов в облаках и облаков с окружающей атмосферой в формировании их макро- и микроструктурных характеристик, исследование образования и развития облаков в целом с учетом их эмерджентных свойств, т.е. с учетом этих взаимодействий [1,3]. Отметим, что до настоящего времени количество работ, посвященных исследованию роли взаимодействия тех или иных процессов в образовании и развитии облаков, крайне ограничено.

В работе [2] на основе двумерной модели микрофизических процессов с заданной термогидродинамикой показано, что вследствие деформации полей термодинамических параметров облака под влиянием восходящих потоков и фазовых переходов воды в облаке в температурном интервале $-10^{\circ}\text{C}\div-25^{\circ}\text{C}$ формируется зона, в которой условия благоприятны для образования и роста градовых частиц. Конечные размеры градин будут зависеть от места образования их зародышей в данной зоне и времени их нахождения в ней. Образование слоев различных видов в градинах можно объяснить изменением режима роста при их движении в указанном температурном интервале.

В работе [13] на основе трехмерной нестационарной модели с детальным учетом процессов электризации, исследовано формирование положительного и отрицательного объемных электрических зарядов, рассчитаны характеристики электростатического поля на разных стадиях развития. Удалось показать, что учет процессов электрической коагуляции при формировании микроструктуры мощных конвективных облаков приводит к более быстрому формированию конвективных облаков.

Что касается взаимодействия облаков с атмосферой, то его влияние на развитие мощной конвекции было обнаружено относительно давно. Но, несмотря на это, исследованию этого вопроса посвящено достаточно ограниченное количество теоретических [11] и экспериментальных [6,9,10,14,17,31] исследований. Как было отмечено, в этих исследованиях игнорировались системные свойства облаков.

В работе [1] с учетом этих свойств на основе этой же модели облаков проведено детальное исследование влияния структуры ветра в атмосфере на формирование их макро- и микроструктурных характеристик, получено формирование зон локализации капель и кристаллов в конвективных облаках, а также их радиолокационной структуры. По результатам расчетов, вследствие взаимодействия облаков с атмосферой зоны восходящих потоков и выпадения осадков из облаков оказываются разнесенными в пространстве.

В качестве примера на рис.1-6 приведены результаты расчетов облака, которое наблюдалось на Северном Кавказе 05.06.2013 г. Рисунки соответствуют 20-й минуте его развития. Изолинии восходящих и нисходящих потоков воздуха в облаке изображены на рис.1. Структура этих потоков, как можно заметить на рисунке, довольно сложная. Максимальная скорость восходящих потоков в этот момент времени уже большая и составляет примерно 41 м/с.

Изолинии влажности и ледности изображены на рис.2. Максимальное значение влажности в этот момент времени также существенно и составляет 9,6 г/м³. Можно заметить, что в этот момент времени из облака уже выпадают осадки. На рис.3-4 приводятся изолинии ледности и отклонений температуры воздуха в различных частях облака от ее значений в окружающей атмосфере. Можно заметить, что область локализации кристаллов в облаке располагается в верхней части зоны восходящих потоков. Максимальное значение параметра в этот момент времени составляет 1,9 г/м³.

Что касается поля отклонений температуры воздуха в облаке от температуры в окружающей атмосфере, то, как можно заметить на рис.3, оно крайне неоднородное. В зоне восходящих потоков температура воздуха заметно выше, чем в окружающей атмосфере на той же высоте (максимальное отклонение по результатам расчетов равно 8.41°C). Над этой зоной она ниже, чем в

атмосфере, причем максимальное отклонение составляет 6.4°C . Результаты расчетов отклонения температуры воздуха в облаке от температуры воздуха в окружающей атмосфере, приведенные на рис.4, еще раз указывают на то, что оно, как было показано в [2], может оказать существенное влияние на формирование микроструктуры облаков.

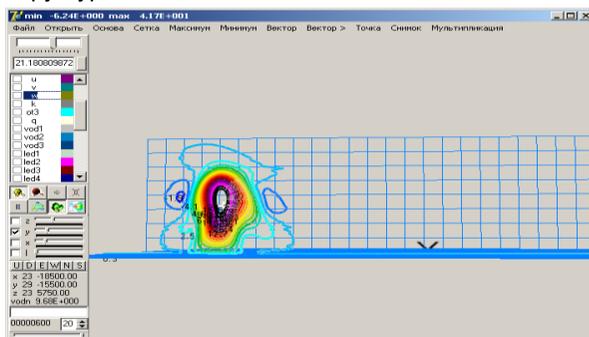


Рис.1. Вертикальные потоки воздуха (восходящие и нисходящие). $W_{\max} = 41$ м/с.

Отметим, что отклонение температуры воздуха в облаке от температуры воздуха в окружающей атмосфере является следствием взаимодействия процессов в облаках.

По результатам расчетов, турбулентность в облаке также крайне неоднородна.

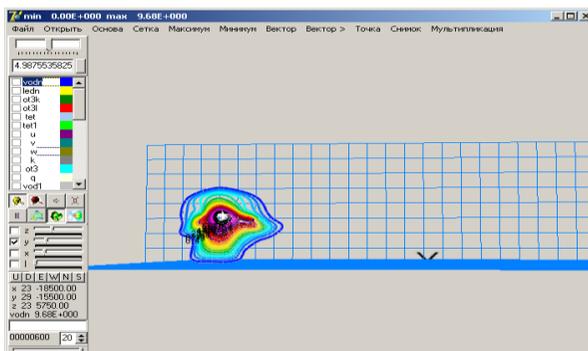


Рис.2. Изолинии водности.

В облаке образуются две области, где наблюдается повышенная турбулентность. Одна из них располагается над зоной восходящих потоков, а вторая – ниже, где более интенсивно взаимодействуют восходящие и нисходящие

дыщие потоки. Максимальное значение коэффициента турбулентности в первой области достигает $K_{\max} = 990 \text{ м}^2/\text{с}$, а во второй области оно меньше. Между этими областями имеется зона, где значения коэффициента турбулентности относительно небольшие. Она находится примерно на уровне максимальных значений скорости восходящих потоков.

Вклад кристаллической фазы в облаке в формирование поля отражаемости в этот момент времени невелик, оно формируется преимущественно каплями. Была исследована и трансформация электрических характеристик облака. Получено, что картина их формирования, в частности напряженности электростатического поля, совпадает с результатами природных наблюдений.



Рис.3. Изолинии лёдности.

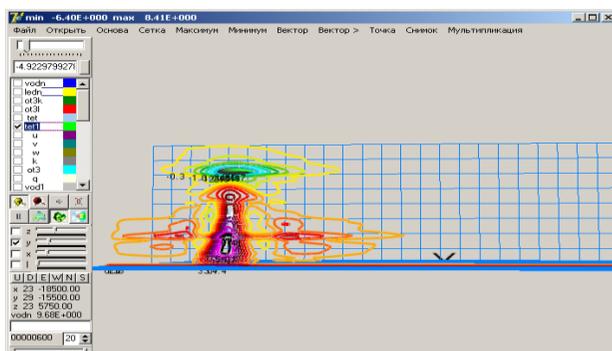


Рис.4. Изолинии отклонения температуры воздуха в облаке от температуры воздуха в окружающей атмосфере.

По результатам расчетов ледяная фаза в облаке образуется за счет замерзания капель, а рост крупных ледяных частиц, крупы и градин происходит преимущественно за счет поступающих снизу в область их сосредоточения переохлажденных капель (рис.5). Важно еще заметить, что ветер в атмосфере обтекает изоповерхность или зону повышенных скоростей восходящих потоков (рис.6).

Остановимся на некоторых результатах моделирования активного воздействия на градовые процессы. Как было отмечено выше, до настоящего времени существуют различные концепции активного воздействия на градовые процессы. Они основаны на представлениях об образовании и развитии градовых облаков, сложившихся у их авторов в 60-70-х годах прошлого века. Поэтому они на достаточном уровне научно не обоснованы.

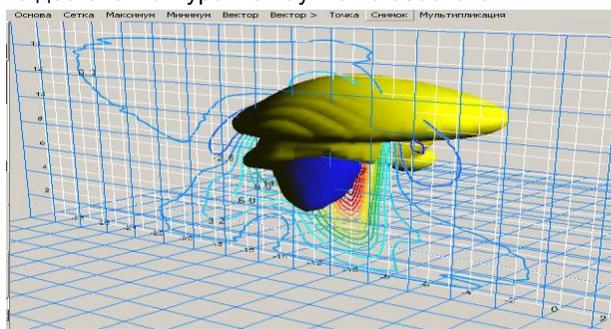


Рис.5. Области сосредоточения водности (синий цвет) и ледности (желтый цвет) на фоне изолиний восходящих потоков.

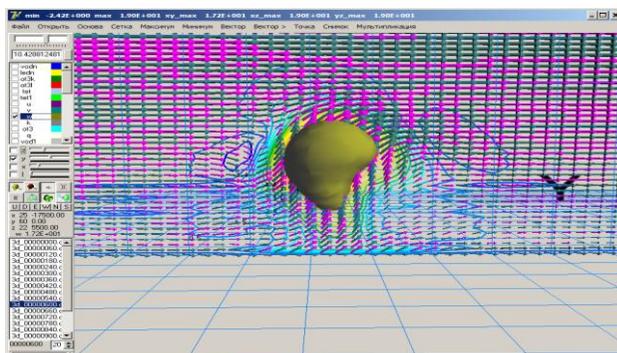


Рис.6. Структура потоков в вертикальной плоскости, пересекающей облако по направлению его движения. Приведена изоповерхность 10 м/с.

Добавим еще, что градовые облака относятся к сложным физическим системам, важными особенностями которых являются существенная трехмерность, нестационарность и нелинейность. При разработке метода воздействия на градовые облака должны учитываться эти особенности, они должны базироваться на детальных исследованиях их поведения при различных вариантах внесения реагента и с учетом этих особенностей. Единственным методом проведения таких исследований является математическое моделирование.

В работе [3] приводятся результаты моделирования активного воздействия на градовые процессы на основе отмеченной двумерной модели. Расчеты проводились для различных вариантов внесения в облако искусственных кристаллов. Путем варьирования параметров источника этих кристаллов исследовалось влияние на формирование микроструктурных характеристик облака их концентрации, места и времени их внесения в облако, формы источника кристаллов. В качестве контрольного значения для определения эффективности активного воздействия использовалось число крупных градовых частиц, находящихся в облаке за период времени, в течение которого исследуется эволюция градового облака.

Не останавливаясь подробно, отметим, что с точки зрения предотвращения образования градин опасных размеров, наиболее эффективным является внесение частиц льдообразующего реагента на уровень $-10...-12^{\circ}\text{C}$ в область с умеренными восходящими потоками. Кроме этого, воздействие должно начинаться до образования градин опасных размеров, а засеивать следует ограниченный объем облака, где условия благоприятны для взаимодействия частиц реагента с облачной средой и достижения цели воздействия. Важно отметить, что по результатам расчетов эффект воздействия на облако в зависимости от места внесения частиц реагента может быть положительным, отрицательным или нулевым, что не учитывается в существующих технологиях активного воздействия. Поэтому были проведены расчеты для сравнительного анализа эффективности различных способов внесения реагента в облако (точечного и линейного).

Численные эксперименты по моделированию активного воздействия на градовые процессы были проведены и на основе трехмерной модели с детальным учетом процессов. И в этом случае расчеты проводились для различных вариантов внесения в облако искусственных кристаллов. Но в отличие от двумерной модели использовался плоскостной источник кристаллов. В качестве примера на рис.7 приведены результаты расчетов радиолокационной структуры облака в вертикальной плоскости в естественных условиях

его развития и при активном воздействии. Можно заметить, что активное воздействие привело к предотвращению образования крупных частиц в облаке. В результате воздействия изменилась не только радиолокационная структура облака, но и структура осадков на земле.

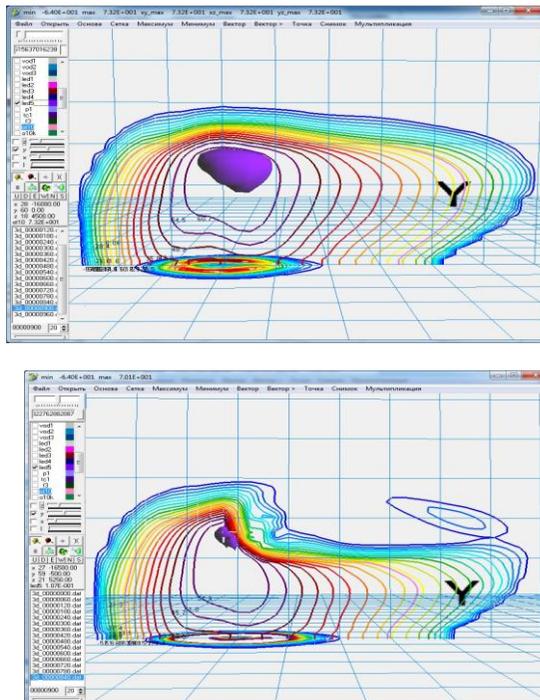


Рис.7. Вертикальный разрез облака без воздействия и с воздействием.

В результате расчетов по трехмерной модели градовых облаков получено, что наиболее эффективным для предотвращения образования градин является полученный выше температурный интервал.

Список литературы

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Тапасханов В.О., Шаповалов А.В. и др. Физика градовых облаков и активных воздействий на них: состояние и перспективы развития. - Нальчик: ООО «Печатный двор», 2013. – 216 с.

2. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шоранов Р.А. Численные исследования образования и роста града при естественном развитии облака и активном воздействии // Метеорология и гидрология. 1994. №1. - С. 41-48.
3. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шоранов Р.А. О некоторых результатах численного моделирования активного воздействия на мощные градовые облака // Тр. ВГИ. 1996. Вып. 89. С. 37-47.
4. Бибилашвили Н.Ш., Ковальчук А.Н., Терскова Т.Н. Радиолокационные исследования трансформации воздушных потоков в кучево-дождевых облаках // Тр. Пятого Всесоюзного совещания по радиометеорологии. 1981. С. 33-37.
5. Денис А. Изменение погоды засевом облаков. – М.: Мир, 1983. 272 с.
6. Ковальчук А.Н. О влиянии ветрового сдвига на выпадение града // Тр. ВГИ. 1969. Вып.14. С.39-48.
7. Мазин И.П. Некоторые вопросы теории облачных ядер конденсации // Метеорология и гидрология. 1980. №8. С.5-12.
8. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака: строение и физика образования.- Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 273с.
9. Мальбахова Н.М. Взаимосвязь структуры градовых облаков с вертикальной структурой ветра в атмосфере // Тр. ВГИ. 1990. Вып. 80. С. 99-106.
10. Ньютон Ч.У. Гидродинамическое взаимодействие с окружающим полем ветра как один из факторов развития кучевых облаков. Динамика кучевых облаков.- М.: Мир, 1964. С.187-201.
11. Пастушков Р.С. Численное моделирование взаимодействия конвективных облаков с окружающей их атмосферой // Тр. ЦАО. 1973. Вып.112. - С.3-14.
12. Хоргуани В.Г. Микрофизика зарождения и роста града.- М.: Гидрометеиздат, 1984.-187 с.
13. Шаповалов А.В. Моделирование эволюции конвективных облаков с учетом электрических процессов//Математическое моделирование. 2003. Т.15. № 4. С. 65-76.
14. Шметер С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. 287 с.
15. Berry E.X., Reinhardt R.L. An analysis of cloud drop growth by collection. Part I. Double distributions//J. Atmos. Sci. 1974. V.31.N. 7. P.1825-1831.
16. Bigg E.K. Report on the ice nucleus workshop. - Fort Collins, Colorado, 1971.

17. Browning K.A., Foote G.B. Air flow and hail growth in super cell storms and some implications for hail suppression// Quart. J. Roy. Met. Soc. 1975. N.102. P. 499-534.
18. Browning K.A., Ludlam F.H. Airflow in convective storms//Q.J. Roy. Met. Soc. 1962. V.102, N.376. P. 499-533.
19. Byers H.R., Braham R.R. The thunderstorm. – Wash. 1949. 287 p.
20. Clark T. Numerical Simulation with a Tree-Dimension Cloud Model: lateral Boundary Condition Experiments and Multiceller Severe Storm Simulations//J. Atm. Sci. 1979. V.36, N.11. P. 2191-2215.
21. Cotton W. R., Tripoli G. J., Rauber R.M., Mulvihill E. A. Numerical simulation of the effects of varying ice crystal nucleation rates and aggregation processes on orographic snowfall//J. Climate Appl. Meteor. 1986. N. 25. P. 1658–1680.
22. Dessens H.A. Project for a formation of cumulonimbus by artificial convection. Physics of precipitation//Proc. of the Cloud Phys. Conf. – Wood Hole, Massachusetts, 1959.
23. Fletcher N.H. On contact nucleation//J. Atmos. Sci. 1970. Vol. 27. N. 7. P. 1098-1099.
24. Foote B.G., Krauss T.W, Makitov V.S. Hail metrics using conventional radar//85th Annual Meeting of American Meteorological Society, 9-13 Jan. 2005. San Diego. CA, USA.
25. Komabayashi H., Gonda T., Isono K. Lifetime of a water drop before breaking and size distribution of a fragment droplet//J. Meteorol. Soc. Japan. 1964. V.42. N.3. P.330-340.
26. Ono A. Growth mode of ice crystals in natural clouds//J. Atmos. Sci. - 1970. - Vol. 27, №4. - P. 649-658.
27. Pruppacher H.R., Klett J.D. Microphysics of clouds and precipitation. – D. Redial Pub. Co., 1978. - 714 p.
28. Srivastava A.C. Size Distribution of Raindrops Generated by their Break-up and Coalescence//J. Atmos. Sci. 1971. V.28. N. 3. P. 410-415.
29. Vali G. Quantitative evaluation of experimental results on the heterogamous freezing nucleation of super cooled liquids//J. Atmos. Sci. 1971. Vol. 23. N.3. P. 402-409.
30. Weickmann H. K. Growth models of atmospheric ice crystals//В сб.: Вопросы физики облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. С.79-101.
31. You Man Kong. Perturbation pressure and cumulus convection//J. Atm. Sci. 1979. V.36. N.4. P. 690-694.

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ В ПРОВЕДЕНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ И МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ ЯК-42Д «РОСГИДРОМЕТ»

А.С. Азаров¹, Ю.А. Борисов¹, Б.Г. Данелян¹, В.В. Петров¹, М.А. Струнин¹,
Б.А. Фомин¹, В.У. Хаттатов¹, С.М. Вакуловский², А.А. Синькевич³

1- ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный,
2 -ФГБУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск,
3 - ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

В рамках реализации Федеральной целевой программы развития системы геофизического мониторинга над территорией Российской Федерации, в конце 2013 года, впервые в Российской Федерации, был создан многоцелевой самолет-лаборатория Як-42Д «Росгидромет», оснащенный самым современным оборудованием и приборами геофизического мониторинга (рис.1).

Самолет-лаборатория создан для решения следующих задач:

- исследования строения и состава атмосферы и характеристик подстилающей поверхности в целях мониторинга окружающей среды;
- проведения и контроля активных воздействий на гидрометеорологические процессы в атмосфере;
- валидации и калибровки различных систем дистанционного исследования атмосферы и поверхности.



Рис.1. Многоцелевой самолет-лаборатория Як-42Д «Росгидромет».

Ниже представлены основные летно-технические характеристики созданного самолета.

Летный экипаж – 3 человека;

Научный экипаж – 14 операторов;

Максимальная высота полета – 10 200 м;

Максимальная коммерческая нагрузка- 12 000 кг;

Дальность с нагрузкой 5 000 kg – 4 100 km;

Диапазон скоростей полета – от 350 до 700 км/ч;

Максимальный взлетный вес - 57 500 kg.

Для проведения исследований на борту самолета установлено семь аппаратно-программных комплексов (АПК) и бортовой информационно-вычислительный комплекс БИВК:

1. АПК-1: комплекс для измерения навигационных параметров полета и термодинамических параметров атмосферы;

2. АПК-2: комплекс для измерений газового и аэрозольного состава атмосферы;

3. АПК-3: комплекс для измерений радиационного баланса и дистанционных исследований подстилающей поверхности;

4. АПК-4: комплекс для мониторинга радиоактивных загрязнений;

5. АПК-5: комплекс для измерения микрофизических параметров облаков и технические средства их модификации.

6. АПК-6: комплекс для радиолокационных исследований атмосферы;

7. АПК-7 комплекс для измерения электрических характеристик атмосферы;

8. БИВК - система регистрации данных на борту самолета-лаборатории, внутренняя локальная вычислительная сеть, система передачи данных в наземные информационно-аналитические центры по спутниковому и радиоканалам.

В общей сложности на борту самолета установлено 67 различных измерительных приборов, на фюзеляже самолета и на подкрыльевых пилонах размещено 52 наружных датчика, на борту организована локальная вычислительная сеть, включающая в себя 23 промышленных компьютера, сетевой сервер времени, Центральный сервер с базой данных самолетных измерений.

Общая схема размещения оборудования и приборов геофизического мониторинга на самолете-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» представлена на рис.2.

На рис.2 цифрами обозначены:

1. Комплекс для измерений термодинамических характеристик атмосферы и навигационных параметров полета.

2. Комплекс для измерений газового и аэрозольного состава атмосферы.

2.1. Многоволновый самолетный лидар ML-375-A.

3. Комплекс для измерений радиационного баланса и дистанционных исследований

подстилающей поверхности.

- 3.1. Гиперспектральная камера;
- 3.2. 4-х канальный тепловизор 4КСР(Т);
- 3.3. Датчики актинометрического комплекса.

4. Комплекс для исследований радиоактивных загрязнений.

4.1. Гамма-спектрометр высокого энергетического разрешения GEM 40-86 «ORTEC» с германиевым детектором;

4.2. Шлюзовая камера – заборник аэрозольных проб «Вега-1М».

5. Комплекс для измерения микрофизических характеристик облаков, осадков, облакообразующих аэрозолей и средства активных воздействий.

5.1. Система отстрела пиропатронов УВ-26 на 1024 ствола;

5.2. Генератор мелкодисперсных частиц льда на жидком азоте ГМЧЛ-А.

6. Радиолокационный комплекс.

6.1. Когерентный радиолокатор с активной фазированной решеткой.

7. Комплекс для измерений электрических характеристик атмосферы.

7.1. Датчики измерителей напряженности электрического поля СПНП-011.

8. Центральный сервер самолетной системы сбора данных и аппарата передачи данных по спутниковому и радиоканалам.

8.1. УКВ антенна системы передачи данных по радиоканалу;

8.2. Антенна системы спутниковой связи.



Рис.2. Общая схема размещения научного оборудования на борту самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».

Начиная с мая 2014 г. началось практическое использование самолета-лаборатории в работах по мониторингу атмосферы, исследованиям микроструктуры облаков и в работах по метеозащите мегаполисов. В период с 07 мая по 26 июня 2014 г. выполнено 19 исследовательских полетов с бортоператорами-испытателями на борту. Общий налет составил 85 летных часов.

При проведении полетов была выполнена серия исследований в Московском и Арктическом регионах, а так же работы по метеозащите города Москвы.

На рис.3. Представлен маршрут полета самолета Як-42Д «Росгидромет» при выполнении работ по метеозащите г. Москвы 12 июня 2014 г.

На рис. 4. Показано изображение траектории полета на радиолокационной карте при пересечении вершины конвективного облака.

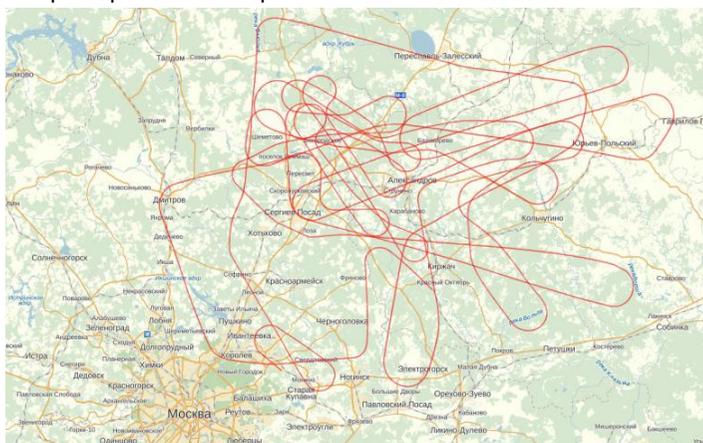


Рис.3. Маршрут полета самолета Як-42Д при выполнении работ по метеозащите г. Москвы 12 июня 2014 г.

На рис.5,6 показаны результаты измерений микрофизических характеристик конвективного облака, полученные при пересечении его вершины. Рис.5 – спектры размеров и изображения облачных частиц, рис.6 – изображения облачных кристаллов, полученные при впересечении облака.

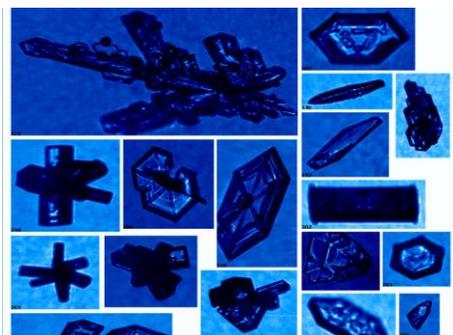


Рис.6. Изображения облачных кристаллов, полученные при пересечении облака.

При проведении исследований самолет совершил три полета в Арктический регион. На рис.7. Представлены маршруты полетов 9–10 и 18–19 июня 2014 г.

При проведении полетов проводилось вертикально-горизонтальное зондирование атмосферы вдоль маршрута полета с вертикальным шагом 400–500 м. На рис.8. показан профиль полетов, выполненных 18–19 июня 2014 г.

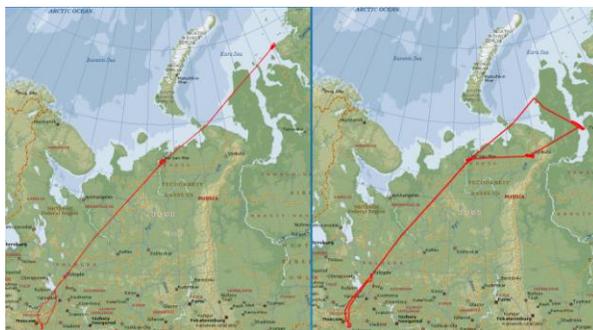


Рис.7. Маршруты полетов самолета-лаборатории Як-42Д 9–10 и 18–19 июня 2014 г.

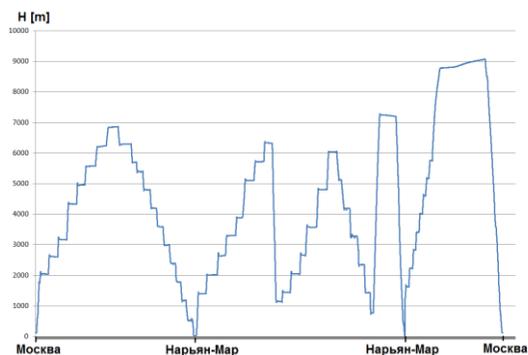


Рис.8. Вертикальный профиль полетов самолета Як-42Д 18–19 июня 2014 г.

В результате были получены вертикальные профили различных газовых составляющих атмосферы (рис.9).

26 июня 2014 г. был выполнен полет в рамках работ по мониторингу загрязнений в Московском регионе.

Цели полета: оценка уровней загрязнений атмосферы в Московской области; валидация моделей распространения примесей.

Ожидаемый результат: экспериментальные данные об уровнях загрязнений атмосферы в Московской области.

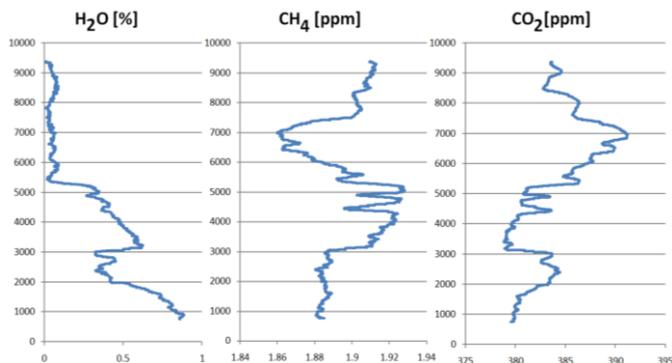


Рис. 9. Вертикальные профили водяного пара, метана и углекислого газа, полученные при проведении полетов самолета Як-42Д.

Выбор маршрута полета осуществлялся с помощью предварительно рассчитанного направления переноса примесей с территории г. Москва на период проведения мониторинга с использованием разработанных в ЦАО дисперсионных и траекторных моделей переноса примесей. Предполагаемое положение шлейфа (распределение концентраций примесей в слое 0–

1000 м) выноса загрязняющих веществ с территории Москвы по результатам расчетов на 16 ч МСК приведено на рис.10.

В соответствии с прогнозом положения шлейфа загрязнений маршрут полета был построен таким образом, чтобы можно было провести измерения в невозмущенной шлейфом зоне – с наветренной стороны от Москвы и непосредственно в зоне шлейфа. Маршрут полета представлен на рис.11. Синим прямоугольником показано положение рис.10 с изображением шлейфа.

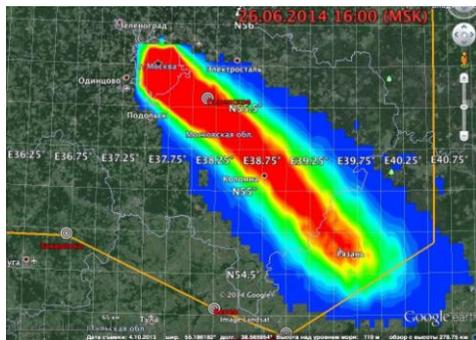


Рис.10. Прогноз положения шлейфа загрязняющих веществ на 16 ч МСК.

Уровень фоновых загрязнений был определен по измерениям на высоте 500 м с наветренной стороны Москвы (см. рис.11). При пролете над «чистой» частью области с помощью приборов UHSAS (ультрамелкие частицы аэрозоля 0,055 –1 мкм), PCASP (малые частицы аэрозоля 0,1–3 мкм), SP2 (частицы черной сажи), CLD780 (окислы азота NO и NO_x) были определены фоновые значения концентраций:

- по черной саже – 9 см^{-3} ;
- по ультрамелким частицам (0,055 –1 мкм) - 40 см^{-3} ;
- по мелким частицам (0,1 –3 мкм) - 34 см^{-3} ;
- по окиси азота NO – 0,75 ppb;
- по окислам азота NO_x – 1,25 ppb.

Маршрут полета самолета в зоне шлейфа контролировался и корректировался по прогностической схеме шлейфа и по данным навигационного и термодинамического комплекса, выведенным на бортовой монитор. Перед выходом самолета в зону шлейфа была выполнена зондировка с высоты 3000 м до высоты 24 м.

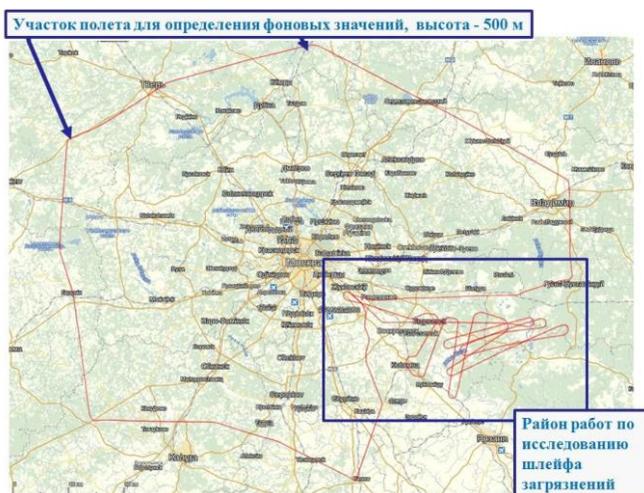


Рис. 11. Маршрут полета самолета Як-42Д при исследовании загрязнений 26.06.2014 г.

На высотах больших 2500 м концентрация мелких и ультрамелких частиц была близка к фоновой, определенной по измерениям с наветренной стороны, а частицы сажи практически отсутствовали.

При послеполетном анализе данных был проведен перерасчет шлейфа выбросов по фактическим метеоусловиям. Внешний вид откорректированного шлейфа представлен на рис.12, где белыми линиями отмечена траектория полета самолета-лаборатории при исследовании шлейфа. По результатам проходов поперек шлейфа на высотах 340, 610, 850 и 1080 м были построены вертикальные сечения распределений концентраций аэрозолей различного происхождения и газов. Местоположение сечений отмечено на рис.12 красной линией. Результаты анализа приведены на рис.13. Полученные сечения показали наличие ядра шлейфа с концентрациями аэрозольных частиц, почти на порядок превышающими фоновые значения. Четкого ядра по концентрациям газов выделить не удалось, однако в районе шлейфа наблюдались концентрации окислов азота превышающие фоновые значения на 20–30%, т.е. выше ошибок измерений. На рис.13 приведены также средние значения концентраций аэрозолей и газов на высоте 500 и 1000 м, полученные при проходе прогнозируемой оси шлейфа. Отметим, что фактически определенное положение шлейфа по самолетным данным оказалось близко к модельным расчетам.

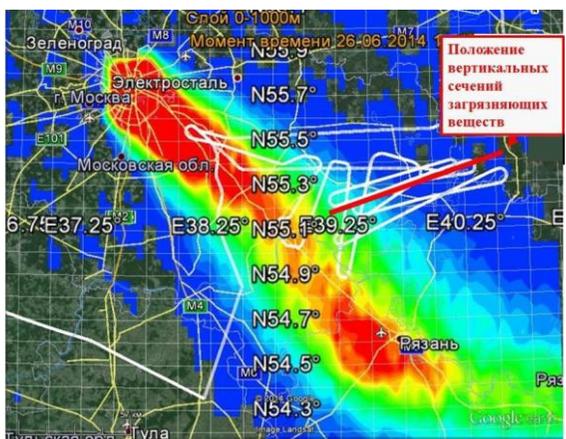
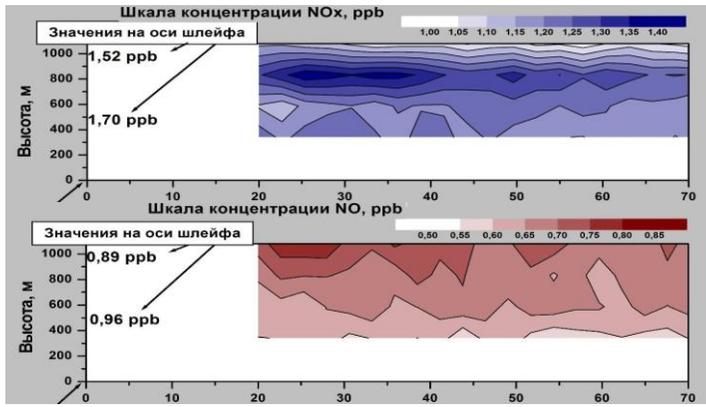


Рис.12. Откорректированное положение шлейфа с маршрутом полета самолета-лаборатории Як-42Д.

Таким образом, результаты измерений, выполненных с помощью аппаратуры, установленной на самолете-лаборатории Як-42Д «Росгидромет», показали что концентрации аэрозольных частиц на расстоянии 45 км от центра Москвы и на высоте 600 м превысили фоновые значения более, чем на порядок, а окислов азота – более, чем на 50%.

Самолет-лаборатория Як-42Д «Росгидромет» показал себя как эффективное средство исследования и мониторинга загрязнений в районах мегаполисов. Аппаратура самолета обеспечивает построение пространственных распределений загрязняющих веществ различного происхождения и позволяет с высокой точностью локализовать их в пространстве.



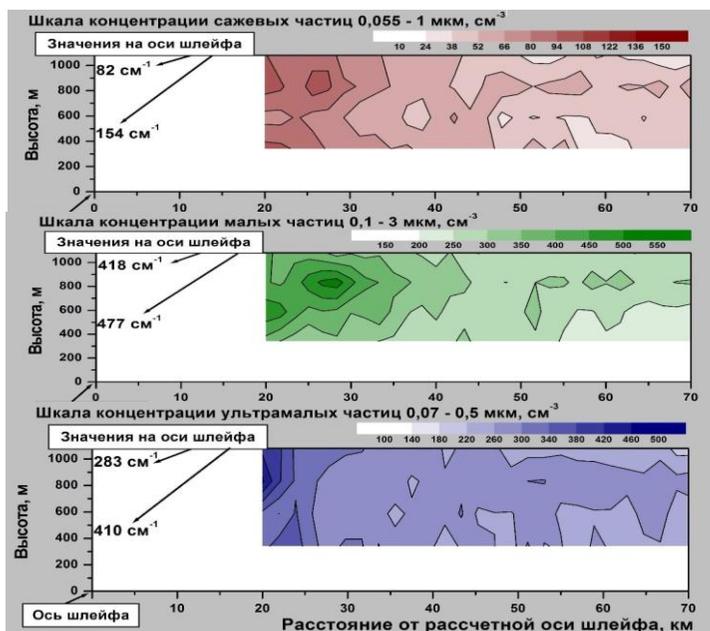


Рис.13. Вертикальные сечения распределений загрязняющих веществ в зоне шлейфа.

Подготовлены квалифицированные бортоператоры-испытатели, обеспечивающие работу аппаратуры в полете, послеполетную обработку и анализ полученных данных.

Самолет-лаборатория Як-42Д «Росгидромет» является новой измерительной системой, обеспечивающей высокую мобильность измерений, проведение измерений в труднодоступных районах и на больших площадях. Созданный самолет-лаборатория позволяет решать большой круг задач по мониторингу атмосферы и подстилающей поверхности, проведению и контролю активных воздействий на гидрометеорологические процессы в атмосфере, а также проводить валидацию и калибровку различных систем дистанционного исследования атмосферы и поверхности.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СНЕГОЛАВИННЫЕ ПРОЦЕССЫ

А.Х. Аджиев¹, Х.Х. Чочаев²

¹ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

²ФГБУ «Северо-Кавказская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы», г. Нальчик

Введение

Необходимость развития противолавинной службы Росгидромета обусловлена освоением горных территорий в целях рекреации и других хозяйственных нужд, перемещением государственных границ значительной протяженности в нивально-гляциальную зону, что резко увеличивает площадь территории, вовлекаемой в хозяйственную деятельность, подверженную воздействию лавин и подлежащую противолавинной защите.

В России территории, подлежащие защите от лавин [1-3], относятся к разным природно-климатическим, геолого-геоморфологическим и высотнопоясным типам и для обеспечения их лавинной безопасности необходимо применение различных научно-методических подходов и технических средств активного воздействия на снеголавиновые процессы.

Расширение на Северном Кавказе территории, подлежащей защите, вызвало необходимость создания противолавинных подразделений, работающих по замкнутому циклу (наблюдение, прогноз, воздействие) в Дагестане, Чечне, Ингушетии, КЧР, а также в районе п. Красная Поляна (Краснодарский край).

С распадом СССР госграница РФ на Кавказе переместилась и проходит по Главному Кавказскому хребту. В связи с этим огромная инфраструктура погранвойск обустроивается и осуществляет свою деятельность в крайне лавиноопасной высокогорной области Кавказа. Общая протяженность границы в лавиноопасных высокогорных областях составляет более 700 км, а площадь лавиноопасной территории более 2 млн.га. При этом противолавинной защитой на Кавказе охвачена только незначительная территория: 28-километровый участок ТрансКАМа в РСО-Алании, 30-километровый участок долины р. Баксан в Приэльбрусье (КБР) и часть рекреационного комплекса в Краснодарском крае – в п. Красная Поляна. Противолавинная защита на этих территориях по мере возможности осуществляется по полной программе (наблюдение, прогноз, активные воздействия на снеголавиновые процес-

сы). В крупном рекреационном комплексе «Домбай» (КЧР) не организована противолавинная защита, которая необходима не только для рекреационной зоны, но и для обеспечения безопасности погранподразделений.

Обширные лавиноопасные территории, занятые пограничными войсками, - центральные районы Дагестана, Чечни и Ингушетии, - также лишены защиты, хотя здесь имели место неоднократные случаи групповой гибели пограничников и местных жителей практически во всех лавиноопасных районах.

Назрела необходимость создания дополнительных подразделений в Краснодарском крае, Забайкалье, на Камчатке и Сахалине. В Хабаровском крае надо организовать группу лавинного дозора с пунктом наблюдений.

Наметившийся подъем экономики и реанимация различных предприятий лесной, нефтегазовой, горнодобывающей промышленности, транспорта и энергетики страны зачастую связан с освоением горных лавиноопасных территорий Сибири и Дальнего Востока. Отмеченные процессы давно уже сделали актуальными проблемы расширения и укрепления противолавинной службы.

Характеристика проблемы, обоснование необходимости ее решения

Дальнейшее развитие противолавинной службы немыслимо без решения общих для всей Службы проблем.

Проблема 1. Дефицит специалистов в области лавиноведения.

Очень серьезной проблемой является практически полное отсутствие в системе Росгидромета научных кадров в области лавиноведения и физики снега, способных осуществлять научно-методическое обеспечение противолавинной службы. Молодые специалисты с достаточным интеллектуальным и образовательным потенциалом в службу не идут по следующим причинам:

- низкая заработная плата сотрудников;
- жесткие условия труда, связанные с риском для жизни;
- отсутствие социальных гарантий и перспектив на жилье.

Назрела острая необходимость создания в одном из ВУЗов России отделения по подготовке специалистов по лавинам.

Проблема 2. Изношенность и неэффективность материально-технической базы противолавинных подразделений службы.

Следует отметить, что материально-техническая база противолавинных подразделений Росгидромета к настоящему времени значительно устарела. Необходимо расширение номенклатуры средств АВ на снеголавинные про-

цессы, материально-техническое переоснащение противолавинных подразделений Росгидромета:

- основное средство АВ на снеголавинные процессы (пушка КС-19 калибра 100 мм), используемое в системе Росгидромета, обладает рядом существенных недостатков, ограничивающих его применение во многих случаях;

- нет мобильных средств, используемых для проведения АВ;

- слабо обеспечена наблюдательная сеть противолавинной службы современными техническими и программными средствами получения и обработки метеорологической и снеголавинной информации;

- отсутствуют дистанционные средства наблюдения за параметрами снежного покрова в горах;

- слабое оснащение или полное отсутствие транспортных средств (снегоходы типа «Буран», снегоочистительная техника, автомобили повышенной проходимости);

- крайне остро стоит проблема обеспечения работников противолавинной службы служебно-жилыми помещениями, ныне существующие в большинстве случаев не отвечают нормам и пришли в негодность;

- недостаточно оснащена служба спец. одеждой, спасательными средствами, горнолыжным и альпинистским снаряжением.

Проблема 3. Отсутствие противолавинных служб в ряде лавиноопасных районов России.

В ряде районов России, в частности в Краснодарском крае, Забайкалье, на Камчатке, Сахалине, Хабаровском крае имеются очаги лавинообразования, оказывающее негативное воздействие на население и объекты хозяйственной деятельности.

Наметившийся подъем освоения горных территорий предприятиями лесной, нефтегазовой, горнодобывающей промышленности, транспорта и энергетики страны, зачастую связаны с освоением горных, лавиноопасных территорий. Отмеченные процессы свидетельствуют о необходимости расширения противолавинных подразделений Службы.

Проблема 4. Неудовлетворительное и нерегулярное финансирование противолавинных подразделений Службы.

Противолавинная служба частично финансируется из федерального бюджета и частично из бюджетов субъектов Российской Федерации. Такая система финансирования приводит к нерегулярному поступлению финансовых средств в противолавинные подразделения.

Противолавинные подразделения Службы являются федеральными учреждениями и должны содержаться за счет федерального бюджета.

Проблема 5. Научно-методическое обеспечение противолавинных работ.

Научно-исследовательская база Высокогорного геофизического института по изучению физики снега и лавин ликвидирована более 10 лет назад. Необходимо возобновить исследования в области лавиноведения и вновь организовать научно-исследовательский полигон в горах.

В России имеются ведомственные противолавинные службы, работающие разными средствами и использующие разные методики. Назрела необходимость их оптимизации.

3. Основные результаты развития противолавинной службы Росгидромета.

Несмотря на имеющиеся проблемы в противолавинном обеспечении отраслей экономики России, в последние годы достигнут ряд важных результатов. В частности реализованы следующие мероприятия.

Разработан и реализован Сводный план организации противолавинного обеспечения олимпийских объектов на территории горного кластера Краснополянского поселкового округа (г. Сочи).

Район проведения Игр «Сочи-2014» отличается уникальными физико-географическими и климато-метеорологическими характеристиками [4]. Это обусловлено близостью района к Черному морю, сравнительно легкой доступностью района для теплых влагонесущих атмосферных фронтов с Атлантики и Средиземноморья, приуроченностью к подножью Главного Кавказского Хребта.

Сочетание орографических и климатических условий способствуют формированию лавин в пределах всей территории Красной Поляны. Наиболее благоприятные условия для формирования снежных лавин имеются в высокогорной пригребневой зоне подветренных склонов, что обусловлено выпадением значительного количества твердых осадков и эрозионно-тектоническим скалистым рельефом. Поэтому район горной зоны Краснополянского поселкового округа г. Сочи входит в число наиболее лавиноактивных рекреационных территорий России.

Распределение лавинных очагов в зависимости от экспозиции склонов очень сложно и неоднородно (рис.1). Наиболее лавиноопасными в районе являются склоны северных экспозиций, они же являются подветренными по отношению к основным влагонесущим атмосферным фронтам и ветрам с Атлантики и Средиземноморья. Практически вся пригребневая подветренная часть склонов хребта Аибга представляет собой сплошную зону лавиносборов (ЛС).

Разработан РД «Организация и проведение противолавинных работ на территории горнолыжного курорта «Роза-Хутор»» [5]. По результатам аэрофотосъемки созданы в 3D формате карта и кадастр лавин на территории ГЛК «Роза-Хутор».

Проведены отбор и подготовка специалистов по обеспечению противолавинной безопасности игр «Сочи-2014». Подготовлен регламент совместных действий противолавинных подразделений по защите от лавин людей и олимпийских объектов на территориях горноклиматических курортов Краснодарского горного кластера. Осуществлены мероприятия по обеспечению противолавинной безопасности в период проведения тестовых соревнований и этапа Кубка Европы по зимним видам спорта (январь-март 2012 г.). Подготовлена и направлена в ГЛК «Роза-Хутор» программа и методика испытаний ручных зарядов «SECUBEX» и лавинной пушки «Lacroix-AVALANCHER» для предупредительного спуска снежных лавин.

Подготовлены карты основных лавинных очагов на территории ГЛК «Альпика-Сервис» (рис.2). Подготовлены карты основных лавинных очагов на территории ГЛК «Горная Карусель».

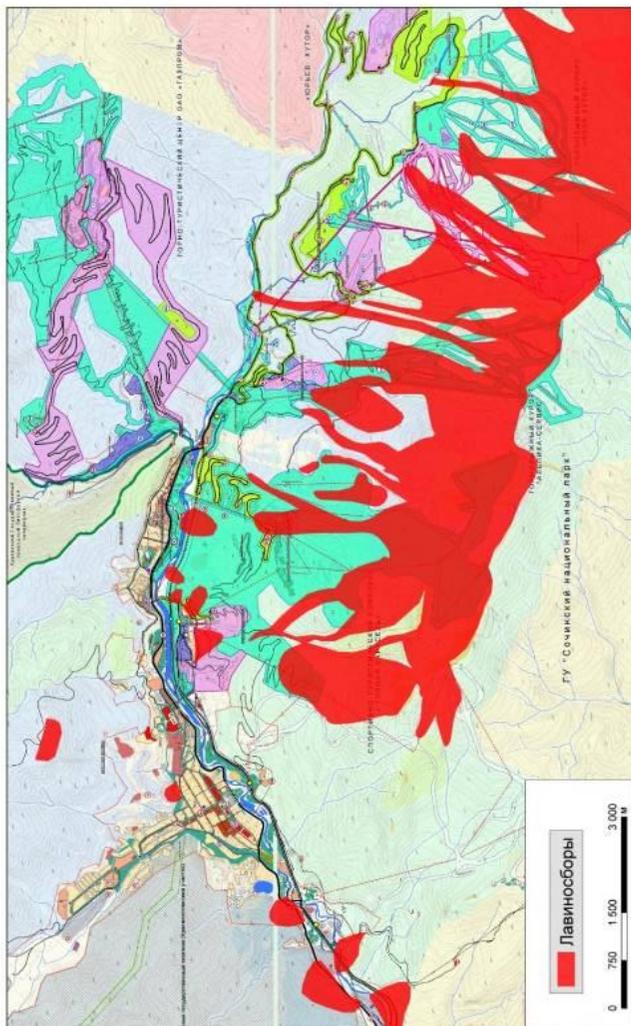


Рис. 1. Карта-схема распределения лавиносоров в районе расположения олимпийских объектов.

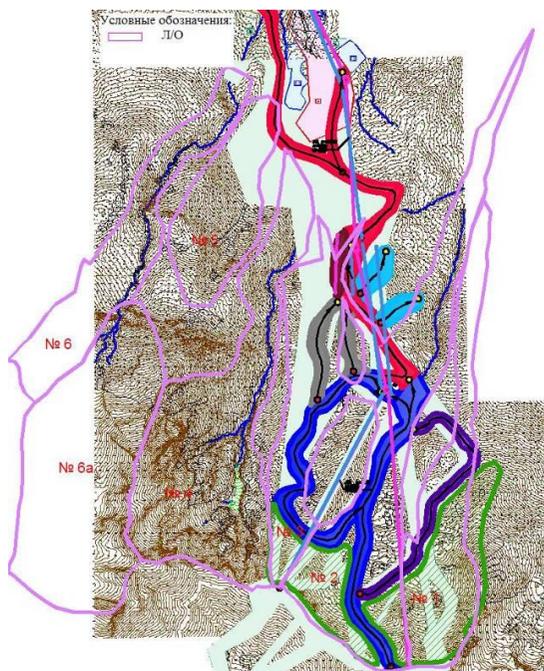


Рис.2. Карта-схема взаимного расположения лавинных очагов и инфраструктуры ГКК «Альпика-Сервис».

Впервые в отечественной практике противолавинных работ разработан и внедрен малогабаритный противолавинный комплекс «Нурис» (рис.3,4). Подготовлены руководящие документы по применению малогабаритных систем АВ на лавины. Проведен анализ и обобщение опыта эксплуатации малогабаритного противолавинного комплекса «Нурис». Основные технические характеристики комплекса «Нурис» следующие:

- Дальность стрельбы 1200 м.
- Калибр 40 мм.
- Эффективность взрывчатого состава 300 грамм
- Состав взрывчатого наполнения – специальный состав
- Однозарядное устройство
- Стрельба одиночными зарядами.



Рис.3. Общий вид «Нуриса».



Рис.4. Способ транспортировки «Нуриса».

Актуальной проблемой противолавинных служб являются локальный прогноз лавинной опасности и мониторинг снегонакоплений. Для этих целей разработан проект руководящего документа «Методика фоновый прогноз лавин по метеопараметрам».

Получены эмпирические уравнения взаимосвязи между вероятностью схода лавин и метеоданными. Предложена методика фоновый прогноз лавинной опасности для Центрального Кавказа. Получен акт испытания фо-

нового прогноза лавинной опасности в противолавинных подразделениях Северо-Кавказской Военизированной службы.

Подготовлен проект «Методики прогнозирования мокрых лавин» на основе аналитической зависимости для времени наступления полного водонасыщения нижележащего слоя снега (при плотности водоснежной массы порядка 800 кг/м^3), в результате чего происходит потеря устойчивости снега на склоне и сход мокрой лавины.

Разработана и внедрена в снеголавинные работы методика дистанционного измерения снегонакопления в горах. Проведены испытания метода с использованием тахеометра Leica TS09ultra 1" Arctic. Получены акты испытаний.

Издан и разослан РД «Методика дистанционного измерения снегонакопления в горах с использованием лазерного дальномера». Получен Акт о его внедрении.

Подготовлена технологическая документация на составляющие телеметрических комплексов (измерители температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра, измеритель высоты снежного покрова). Изготовлен опытный образец телеметрического комплекса для мониторинга снеголавинных процессов в горах.

Список литературы

1. Разумов В.В., Аджиев А.Х., Болов В.Р., Разумова Н.В. и др. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Российской Федерации (под ред. С.К.Шойгу).— М.: Дизайн. Информация. Картография. 2010. 696 с.
2. Залиханов М. Ч. Снежно-лавинный режим и перспективы освоения гор Большого Кавказа. - Изд-во Ростовского ун-та, 1981. 375 с.
3. Лосев К. С. Лавины СССР (распространение, районирование, возможности прогноза). - Л.: Гидрометеиздат, 1966. 131 с.
4. Сводный план организации противолавинного обеспечения олимпийских объектов на территории горного кластера Краснополянского поселкового округа (г. Сочи). Росгидромет, Москва. 2013. 35 с.
5. Аджиев А.Х., Багов М.М., Кумукова О.А, Корнилов Ю.В., Юрченко Н.В. РД 52.37.752-2011 «Организация и проведение противолавинных работ на территории горнолыжного курорта «Роза Хутор».- ООО «Полиграфсервис и Т», 2011. 19 с.

Секция 1

Исследование процессов облако- и осадкообразования. Численное моделирование облачных процессов. Лабораторное моделирование и натурные исследования облачных процессов. Аппаратура и методы измерения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Ю.А. Довгалюк, Н.Е. Веремей, В.Н. Морозов
ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

Введение

Эволюция конвективных, особенно грозовых облаков неразрывно связана с электрическими процессами. В силу тесной взаимосвязи облачных процессов грозовая активность облаков тесно связана с динамикой воздушных потоков, фазовыми превращениями воды и коагуляцией облачных элементов. Грозы представляют собой явление погоды, опасное для человека и хозяйственных объектов (авиация, связь, промышленность и др.). В связи с этим всестороннее исследование электрических процессов в облаках является важной задачей. Эффективным и перспективным методом исследования гроз является численное моделирование.

В ФГБУ «ГГО» разработана численная нестационарная трехмерная модель осадкообразующего кучево-дождевого грозового облака. Детальное описание указанной модели приведено в работах [1,2]. Она позволяет напрямую оценивать грозовую активность облака. При этом не рассматриваются косвенные параметры, а непосредственно используются электрические характеристики (пространственное распределение объемной плотности заряда и напряженности электрического поля).

Авторами выполнен обзор численных моделей электризации конвективных облаков, в том числе с учетом последних работ в этой области. На основании их анализа сделан вывод, что в моделях грозовых облаков особо важен учет механизмов взаимодействия ледяных частиц разных размеров как между собой, так и с жидкими каплями.

1. Базовая модель осадкообразующего кучево-дождевого грозового облака

Полная трехмерная модель грозового кучево-дождевого облака включает: гидротермодинамический блок, описывающий динамику воздушных потоков (уравнения Навье - Стокса) и перенос влаги и электрического заряда; микрофизический блок, описывающий процессы фазовых переходов воды, коагуляции и электризации облачных элементов. Начальными данными являются вертикальные профили температуры и влажности в атмосфере. В результате расчетов получаем пространственно-временное распределение вектора скорости, водности, ледности, интенсивности осадков, радиолокационной отражаемости, объемной плотности электрического заряда, напряженности электрического поля и др. На основе этого распределения строятся временные ходы максимумов указанных величин, а также значений верхней и нижней границ облака и интенсивности осадков у земли.

В динамическом блоке учтено взаимодействие облака с внешним полем ветра (вертикальные профили горизонтальных составляющих его скорости задаются в начальных условиях). В микрофизическом блоке модели учтены основные процессы электризации облачных частиц и осадков: зарядение частиц вследствие захвата атмосферных ионов, диффундирующих к их поверхности (с учетом поляризации частиц во внешнем поле); переход заряда испарившихся частиц в атмосферные ионы; электризация при столкновении и разлете частиц; сложение зарядов частиц при их коагуляции; перераспределение заряда по фракциям при фазовых переходах.

В рамках разработанной модели проведен ряд численных экспериментов. В них изучалось влияние температурно-влажностного строения атмосферы и начального перегрева на эволюцию конвективного грозового облака. Температурно-влажностное строение атмосферы подбиралось характерное для разных физико-географических условий. Начальный перегрев задавался в виде теплового потока и его значение варьировалось в пределах от 10 до 150 Вт/м² и в дальнейшем выбиралось исходя из натуральных данных о высоте верхней границы облака.

2. Пример расчетов эволюции конвективного грозового облака

В качестве примера рассмотрим случай, характерный для дней с развитием конвективных облаков на северо-западе России.

В качестве начальных условий заданы вертикальные профили температуры и влажности (табл.1). Электрическое состояние атмосферы, характеризующее вертикальными профилями положительных и отрицательных ионов, в начальный момент времени соответствует случаю хорошей погоды.

Таблица 1. Вертикальные профили температуры воздуха T и точки росы T_d в невозмущенной атмосфере

P , гПа	T , °С	T_d , °С	P , гПа	T , °С	T_d , °С
1013,0	24,0	17,0	600,0	-6,1	-8,0
900,0	14,0	11,3	400,0	-20,4	-24,0
800,0	8,1	4,9	200,0	-60,0	-80,0

Задан вертикальный профиль горизонтальной скорости ветра. Полагается, что в слое от 0 до 5 км X-составляющая скорости ветра линейно возрастает до 3 м/с, далее остается постоянной, Y-составляющая всюду равна нулю.

Выбрана расчетная область $8 \times 8 \times 12$ км. По всем координатам значения шагов заданы равными 200 м. Шаг по времени задан постоянным (0,1 с), независимым от числа Куранта.

Инициализация модели производилась путем задания возмущения поля температуры в некоторой области вблизи подстилающей поверхности методом Мак-Найдера-Коппа [4]. Путем варьирования подобрано значение теплового потока с поверхности земли (100 Вт/м^2) таким образом, чтобы получаемая при расчетах верхняя граница облаков была близка к рассчитанной по методу частицы (9,5 км). Далее исследован процесс эволюции конвективного грозового облака и выпадающих из него осадков (с учетом электрических процессов).

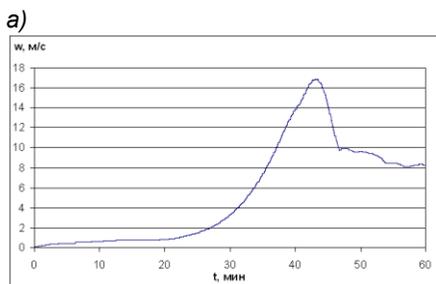
На рис.1 и 2 показан временной ход основных характеристик облака. Из рисунков видно, что при температурно-влажностном строении атмосферы, соответствующем таблице 1, развивается мощное грозоградовое кучево-дождевое облако с высотой верхней границы, достигающей 9,5 км (рис.2а). Скорость восходящего потока достигает 17 м/с, водность облачных и дождевых капель – 2,6 и 6,1 г/м³ соответственно, ледность градин – 4,7 г/м³ (рис.1). Максимальная интенсивность осадков превышает 200 мм/ч (рис. 2б). Данное значение, по-видимому, является завышенным, и является следствием упрощенного описания распределения частиц осадков по размерам. Облако является грозovým; напряженность электрического поля в нем достигает

пробойного значения, которое в модели принято равным $5 \cdot 10^5$ В/м (рис.1е). Значение объемной плотности заряда перед моментом пробоя имеет порядок 10^{-8} Кл/м³ (рис.1д).

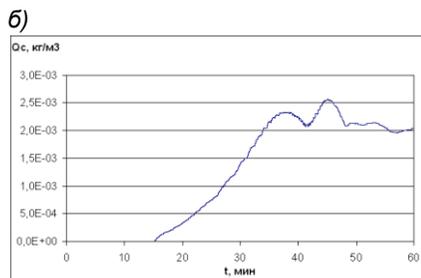
На рис.3 приведен временной ход некоторых характеристик облака (скорость восходящего потока, водность облачных капель, водность дождевых капель), нормированных на их максимальное значение. Из рисунка, в соответствии с подходом, описанным в работе [3], видно, что время эволюции облака можно разделить на три периода: первый – когда пространственные максимумы всех трех величин w , Q_c и Q_r растут со временем, второй – когда часть из них растет, часть убывает, и третий – когда все максимумы убывают. Первый период принято называть стадией роста или развития, второй – стадией зрелости или стабилизации, третий – стадией диссипации.

В результате расчетов получено, что облако проходит все три стадии (для данного случая они приблизительно соответствуют промежуткам времени $0 < t \leq 35$ мин, $35 \text{ мин} < t \leq 47$ мин и $t > 47$ мин соответственно). Это подтверждает тот факт, что модель адекватно описывает эволюцию конвективного облака. Отметим, что именно в начале второй стадии начинается выпадение осадков на подстилающую поверхность (рис.2б), а также начинается резкий рост объемной плотности электрического заряда и напряженности электрического поля (рис.1д, е).

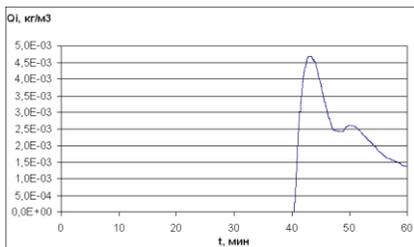
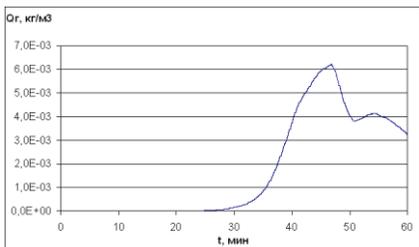
На рис. 4-9 приведены вертикальные профили скорости вертикальных движений, водности облачных и дождевых капель, ледности градин, объемной плотности заряда и напряженности электрического поля для моментов времени $t = 2100$ с и 3300 с, что соответствует началу стадии зрелости и стадии диссипации соответственно. Профили приведены для плоскости XZ, проходящей через середину области решения ($Y = 5000$ м).



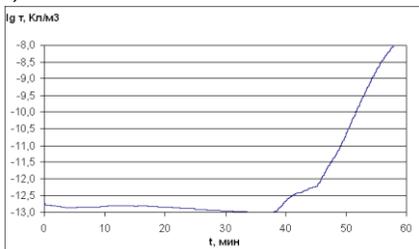
в)



е)



д)



е)

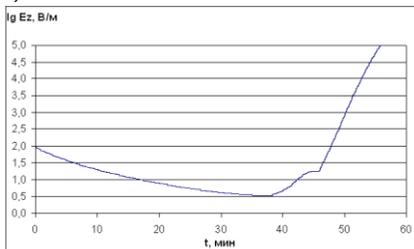
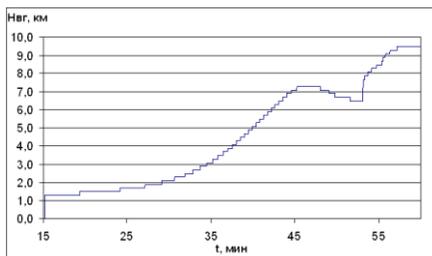
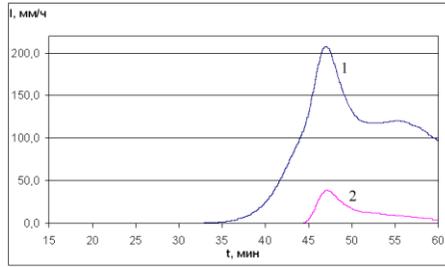


Рис.1. Временной ход максимумов основных характеристик облака:
а – скорости восходящего потока; *б* – водности облачных капель; *в* – водности дождевых капель; *г* – ледности градин; *д* – суммарной объемной плотности электрического заряда; *е* – напряженности электрического поля.

а)



б)



б)

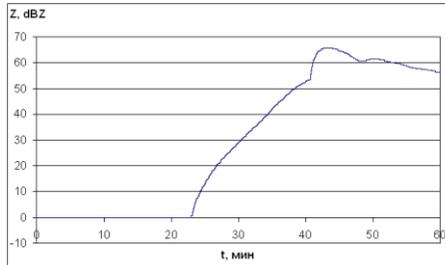


Рис.2. Временной ход основных характеристик облака, которые доступны по данным натуральных наблюдений: а – высота верхней границы облака, б – интенсивность осадков у подстилающей поверхности (1 – дождь, 2 – град), в – радиолокационная отражаемость.

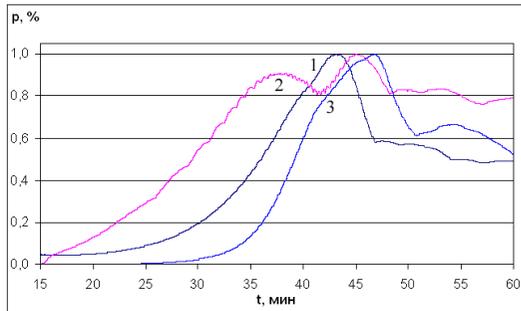


Рис.3. Временной ход отношения пространственного максимума характеристик облака к значению их абсолютного максимума:

$$1 - \max_{x,y,z} w(x, y, z, t) / \max_{t,x,y,z} w(x, y, z, t);$$

$$2 - \max_{x,y,z} Q_c(x, y, z, t) / \max_{t,x,y,z} Q_c(x, y, z, t);$$

$$3 - \max_{x,y,z} Q_r(x, y, z, t) / \max_{t,x,y,z} Q_r(x, y, z, t).$$

Из рисунков видно, что к концу стадии зрелости в нижней части облака и в подоблачном слое начинается выпадение осадков, восходящий поток сменяется на нисходящий, прекращается рост вертикальных и горизонтальных размеров облака.

Вертикальный профиль объемной плотности электрического заряда в целом соответствует наблюдаемым данным: на стадии роста облако заряжено униполярно и отрицательно (компенсирующий положительный заряд сосредоточен в окрестностях облака). Далее формируется диполь с положительным зарядом наверху, который постепенно переходит в трехполюсник с отрицательным зарядом в середине облака и положительным в его вершине и в подоблачном слое (область выпадения осадков). Отметим, что для данного случая изменение зарядовой структуры облака оказалось несколько более сложным: так, на рис.7в видно появление нетипичного отрицательного заряда в верхней части облака.

Отметим, что среди характеристик облака и осадков, пространственно-временное распределение которых получается с помощью модели, имеются такие, которые могут непосредственно измеряться. Это, в первую очередь, верхняя граница облака, радиолокационная отражаемость и интенсивность осадков.

В результате наличия сдвига ветра с высотой профили всех характеристик облака оказываются несимметричными; верхняя часть облака оказывается наклоненной в направлении ветра, что подтверждает адекватность модельных расчетов реальным условиям.

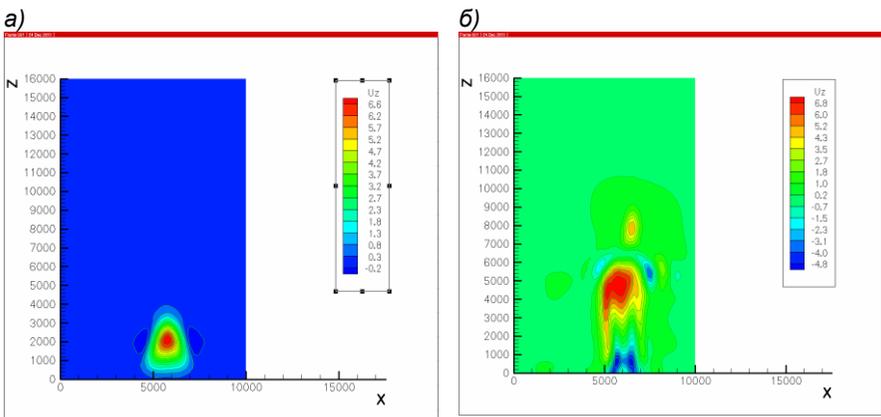


Рис.4. Вертикальный профиль скорости вертикальной составляющей скорости движения среды (м/с) в плоскости XZ (разрез в плоскости $Y = 5000$ м): а) $t = 2100$ с; б) $t = 3300$ с.

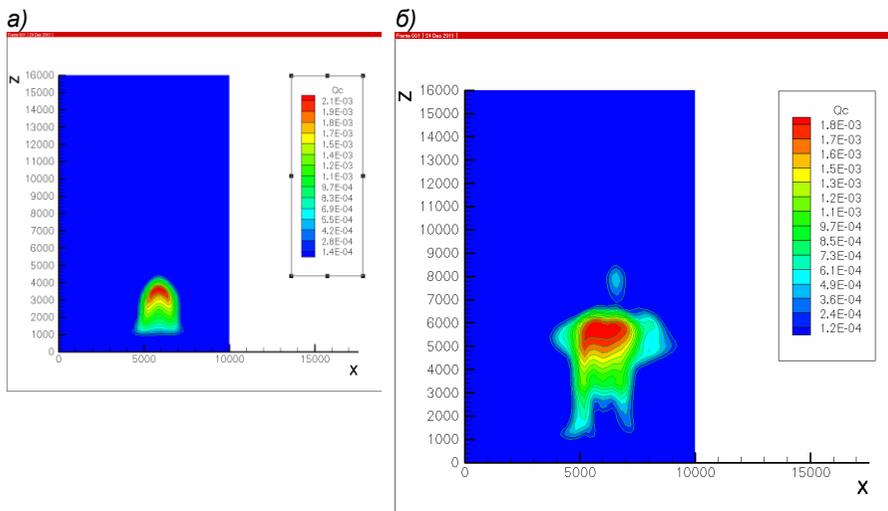


Рис.5. Вертикальный профиль скорости вертикальной составляющей водности облачных каплей ($\text{кг}/\text{м}^3$) в плоскости XZ (разрез в плоскости $Y = 5000$ м): а) $t = 2100$ с; б) $t = 3300$ с.

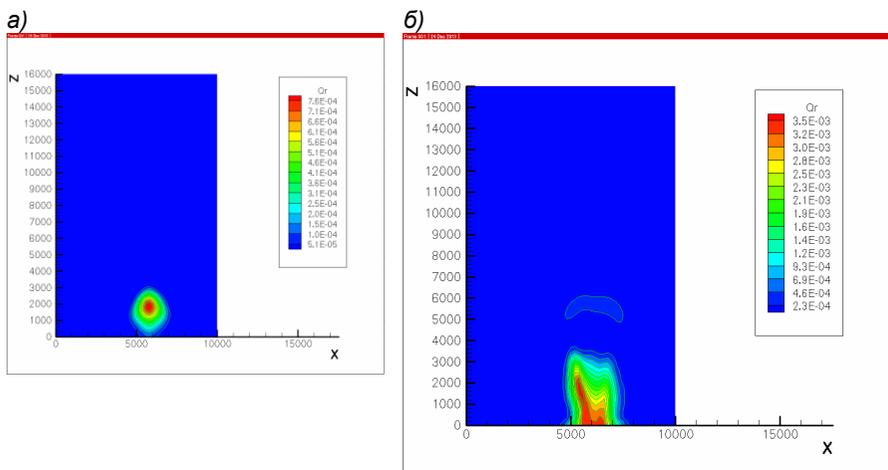


Рис.6. Вертикальный профиль скорости вертикальной составляющей водности дождевых каплей ($\text{кг}/\text{м}^3$) в плоскости XZ (разрез в плоскости $Y = 5000$ м): а) $t = 2100$ с; б) $t = 3300$ с.

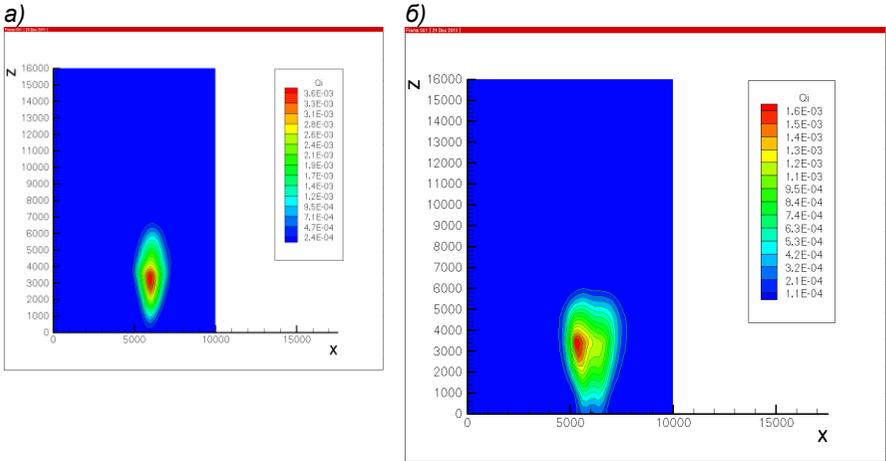


Рис.7. Вертикальный профиль скорости вертикальной составляющей ледности градин (кг/м^3) в плоскости XZ (разрез в плоскости $Y = 5000$ м): а) $t = 2700$ с; б) $t = 3300$ с.

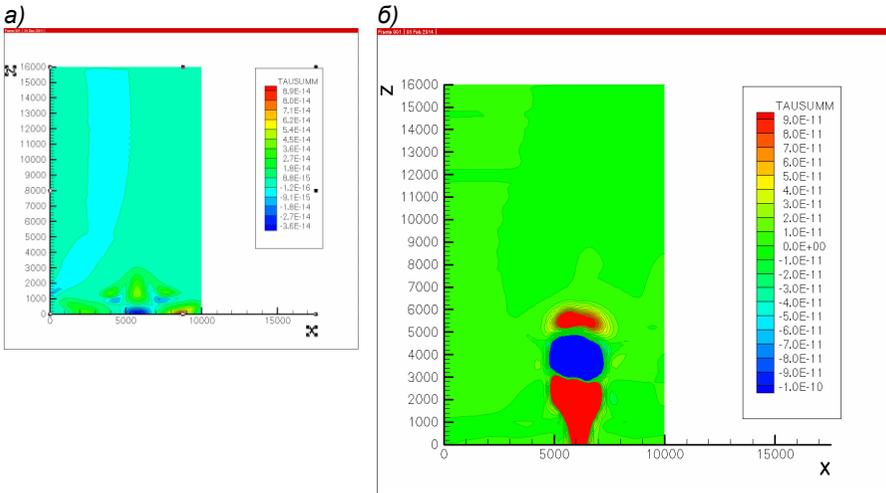


Рис.8. Вертикальный профиль объемной плотности заряда (Кл/м^3) в плоскости XZ (разрез в плоскости $Y = 5000$ м): а) $t = 2100$ с; б) $t = 3300$ с.

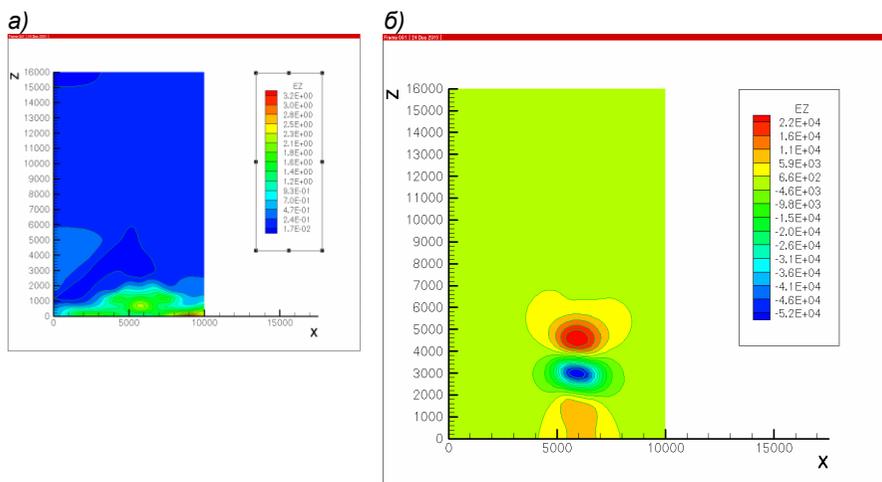


Рис.9. Вертикальный профиль напряженности электрического поля (В/м) в плоскости XZ (разрез в плоскости $Y = 5000$ м): а) $t = 2100$ с; б) $t = 3300$ с.

Заключение

В ГГО разработана численная нестационарная трехмерная модель осадкообразующего кучево-дождевого грозового облака, описывающая достаточно полный спектр динамических, микрофизических и электрических процессов. Модель удовлетворительно воспроизводит эволюцию грозового облака, в том числе его электрической структуры. Временной ход основных характеристик облака (скорость вертикального потока, водность, ледность) позволяет выделить три стадии его жизни: рост; зрелость; диссипация. Пробойное значение напряженности электрического поля достигается на 54-й мин расчетов (41 мин жизни облака) и приходится на стадию диссипации. Сильный рост объемной плотности заряда и напряженности поля начинается в начале стадии зрелости. Таким образом, модель хорошо воспроизводит взаимосвязь между динамическими, микрофизическими и электрическими параметрами облака.

Список литературы

1. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров А.С., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I.

Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока//Тр. ГГО. - 2008. - Вып. 558. - С.102–142.

2. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.В., Шукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II: Микрофизический блок модели//Тр. ГГО. - 2010. - Вып. 562. - С. 7–39.

3. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. Применение полутрехмерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. – СПб, 2013. – 218 с.

4. McNider R.T., Kopp F.J. 1990. Specification of the scale and magnitude of thermals used to initiate convection in cloud models //J. Appl. Met. - 1990. - Vol. 29. - P. 99–104.

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИГРОСКОПИЧЕСКИМИ РЕАГЕНТАМИ НА КОНВЕКТИВНОЕ ОБЛАКО

А.С. Дрофа

ФГБУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск

Одной из основных областей применения разработанной коллективом НИУ Росгидромета трехмерной численной модели конвективного облака [2] является исследование эффекта воздействия на облако гигроскопическими реагентами с целью получения дополнительных осадков. Концепция воздействия гигроскопическими частицами состоит в трансформации спектра облачных капель на начальной стадии конденсации таким образом, чтобы интенсифицировать коагуляционные процессы в облаке и ускорить процессы осадкообразования.

В модели используется параметризованное описание микрофизических процессов в облаке. В частности, для описания процесса формирования дождевых капель в ансамбле взаимодействующих между собой облачных капель (автоконверсия) используется формула Кесслера [5]:

$$\frac{dQ_r}{dt} = K(Q_C - Q_{СП}), \quad (1)$$

где Q_c и Q_r - водность облачных и дождевых капель соответственно; величина K характеризует интенсивность автоконверсии; $Q_{СП}$ - пороговая водность облачных капель, при превышении которой начинает действовать механизм автоконверсии.

Моделирование воздействия гигроскопическими реагентами в модели заключается в том, что в области облака, где находятся гигроскопические частицы, процесс осадкообразования описывается формулой Кесслера с параметрами автоконверсии, отличающимися по величине от параметров в фоновой облачной среде. В тех областях, где концентрация частиц превышает некоторое пороговое значение, формирование осадков рассчитывается по формуле Кесслера, коэффициенты которой зависят от вида и количества гигроскопического реагента. Величины параметров автоконверсии для описания конвективного облака определялись путем сопоставления с данными расчетов по одномерной численной модели конвективного облака с детальным описанием микрофизики, где использовалось кинетическое уравнение для распределения облачных капель по размерам [3]. Для теплых облаков континентального типа мощностью 3-5 км получены величины параметров - $K=0,0002$ и $Q_{СП}=2,6 \text{ г/м}^3$ [1].

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования эффекта воздействия на конвективные облака полидисперсным солевым порошком, разработанным в ФГБУ «НПО «Тайфун» [5]. Данный порошок отличается от всех ранее использовавшихся гигроскопических реагентов оптимальной микроструктурой частиц для интенсификации процессов коагуляции облачных капель и последующего осадкообразования в конвективных облаках. Результаты расчетов по модели облака с детальной микрофизикой показали, что в случае использования солевого порошка при формировании осадков происходит понижение порога и увеличение интенсивности автоконверсии. По результатам этих расчетов были определены величины параметров автоконверсии при воздействии [6]. Величина порога автоконверсии в данном случае оказалась равной $Q_{СП} = 2,2 \text{ г/м}^3$, а интенсивность автоконверсии K определяется массовой концентрацией вводимого солевого порошка G , г/м^3

$$K = 0,0038 + 0,156G . \quad (2)$$

Следует отметить, что приведенные значения параметров автоконверсии относятся к конкретному виду гигроскопического реагента – солевого порошка. Для других гигроскопических реагентов величины параметров автоконверсии необходимо уточнять.

Тестовые расчеты, проведенные по разработанной полной численной модели облака, показали, что результаты расчетов воздействия гигроскопическими реагентами на теплые конвективные облака согласуются с полученными ранее результатами численного моделирования другими исследователями с использованием моделей с детальной микрофизикой. Предложенный метод параметризации достаточно реалистично описывает процессы осадкообразования в облаке, в том числе – при воздействии гигроскопическими реагентами.

Параметры моделируемого облака в трехмерной модели задавались стратификацией температуры и влажности в атмосфере, а также величиной теплового потока начального перегрева для инициализации конвекции. Для моделирования теплых облаков мощностью 3-5 км на соответствующих высотах вводится запирающий температурный слой с градиентом температуры 0,2°C/100 м. В результате при трехмерном моделировании реализуются облака не дающие осадков, а также с осадками в виде дождя и града. Нижняя граница облаков - 800 м, высота верхней границы - от 4 до 6 км. Характеристики выпадающих из моделируемых облаков осадков приводятся в таблице. Вертикальные профили водности облачных капель и скорости подъема воздуха, реализующиеся в расчетах, показаны на рис.1. Вертикальные профили получены в центре моделируемых облаков в моменты времени их максимального развития.

Таблица. Характеристики осадков из облаков без воздействия и при воздействии солевым порошком

Мощность облака	3,2 км		4,2 км		4,7 км	
	без воздействия	воздействие	без воздействия	воздействие	без воздействия	воздействие
Осадки под облаком, мм	–	1,8	2,9	6,9	4,6	9,0
Масса выпадающей воды, тыс. т	–	1,9	7,3	13,9	18,7	26,3
Град, мм	–	–	–	–	0,1	0,34
Площадь выпадения осадков, км ²	–	10,0	16,0	18,0	25,6	27,9

Воздействие солевым порошком на конвективное облако для получения дополнительных осадков предполагает введение реагента в подоблачный слой облака. При численном моделировании воздействия ввод реагента в моделируемое облако производится в слой толщиной 200 м в основание

формирующегося облака на высоте 800 м. Горизонтальные размеры области воздействия в центре моделируемого облака варьировались в пределах от 400 до 2000 м.

Пример распространения области воздействия реагента на оси облака показан на рис.2. Здесь приводятся вертикальные профили массовой концентрации порошка в облаке мощностью 4,2 км при вводе его в облако на 15-й минуте развития облака. Начальная концентрация солевого порошка в подоблачном слое – $0,18 \text{ мг/м}^3$. Из рис.5 видно, что с течением времени область воздействия восходящим потоком воздуха переносится вверх и за счет турбулентности расширяется.

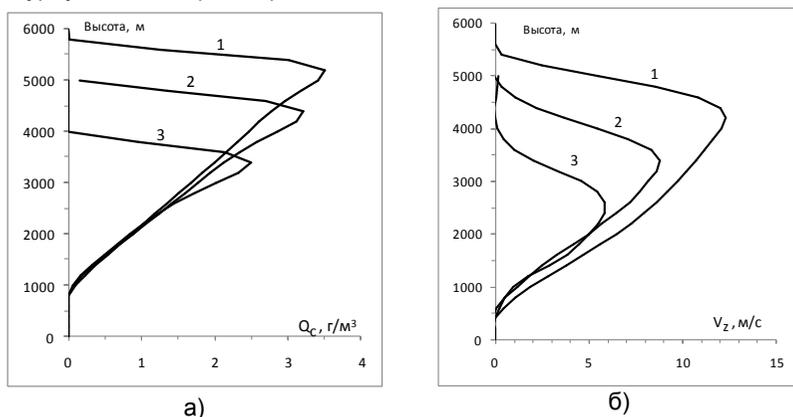


Рис.1. Вертикальные профили водности облачных капель (а) и скорости подъема воздуха (б) в моделируемых облаках мощностью 4,7 км (1), 4,2 км (2) и 3,2 км (3).

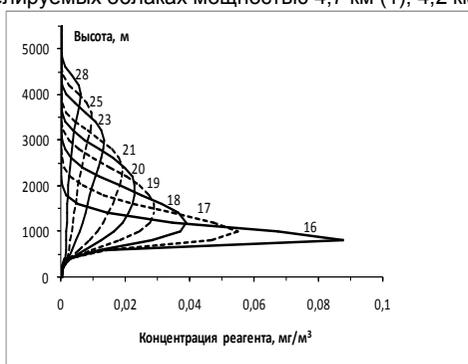


Рис.2. Вертикальные профили массовой концентрации реагента. Цифры у кривых – время от начала формирования облака, мин.

Концентрация реагента по мере распространения его в облаке уменьшается. В области, где концентрация гигроскопических частиц превышает пороговую величину $0,005 \text{ мг/м}^3$, расчеты формирования дождевых капель проводятся с параметрами автоконверсии, соответствующими данному гигроскопическому реагенту.

Временной ход интенсивности осадков на земле под центральной частью облака мощностью $4,2 \text{ км}$ при вводе в облако различного количества солевого порошка показан на рис.3. Размеры области воздействия – $200\text{м} \times 200\text{м} \times 200\text{м}$. Начальная массовая концентрация реагента определяется массой вводимого порошка. Время ввода реагента – 15 -я минута от начала формирования облака. Как видно из рисунка, воздействие солевым порошком приводит к увеличению осадков из облака и к более раннему их выпадению. С увеличением массы вводимого реагента интенсивность осадков и их суммарное количество возрастает до определенного предела. При массе вводимого реагента более 24 кг дальнейшее увеличение количества введенного порошка не приводит к существенному увеличению осадков.

Результаты расчета массы выпадающей из всего облака воды во время дождя и площади выпадения осадков приводятся на рис.4. Здесь показан временной ход интенсивности выпадения дождевой воды в фоновом облаке и при воздействии солевым порошком при общем его расходе 24 кг .

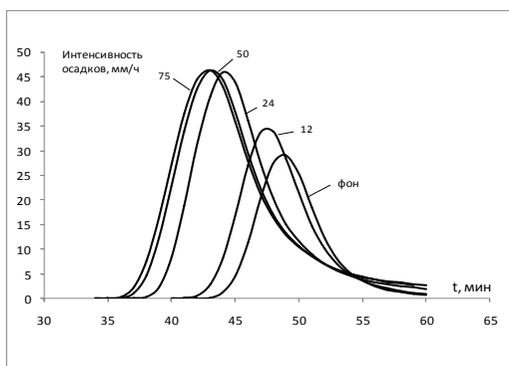


Рис.3. Временной ход интенсивности осадков при воздействии солевым порошком на облако мощностью $4,2 \text{ км}$. Цифры у кривых – расход реагента, кг.

Из рисунка видно, что максимальная интенсивность выпадения воды при воздействии достигала $1,5 \text{ кг/мин}$, в то время как в фоновом облаке она не превышала $1,0 \text{ кг/мин}$. Полная масса дождевой воды из всего облака при этом составила $13,9 \text{ кг}$. Полная масса дождевой воды, выпавшей из фоново-

го облака – 7,34 кт. Таким образом, в данном случае в результате воздействия порошком получается 6,6 кт дополнительной воды. Как видно из рисунка, площадь выпадения осадков при воздействии незначительно увеличивается (от 16 до 18 км²).

Сводные результаты численного моделирования воздействия соевым порошком на облака различной мощности приведены выше в таблице. Здесь приводятся данные расчета суммарных осадков для облаков без воздействия и при воздействии соевым порошком с расходом 24 кг. Схема и режим воздействия – одинаковые для всех облаков.

Из приведенных данных видно, что при одинаковых расходах реагента эффект воздействия (получение дополнительного количества воды) возрастает при воздействии на облака большей мощности. При воздействии на смешанное облако мощностью 4,7 км возрастает также количество выпавшего града.

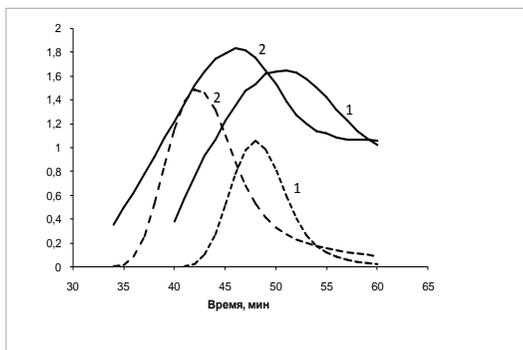


Рис.4. Изменение во времени площади выпадения и массы выпадающей воды из облака мощностью 4,2 км. Штриховые кривые – интенсивность выпадения воды, кт/мин; сплошные – площадь выпадения, км²/10. (1 – фоновое облако; 2 – воздействие)

Приведенные в таблице данные демонстрируют также возможность получения осадков из конвективных облаков небольшой мощности, осадки из которых в обычных условиях не выпадают. Это является одним из преимуществ использования солевого порошка перед другими известными гигроскопическими реагентами, не позволяющими получать осадки из облаков, не дающих осадки.

На рис.5 приводятся результаты расчета количества осадков на земле под облаком мощностью 4,2 км при различных режимах засева облаков соевым порошком. Показаны результаты расчета количества осадков из облаков в зависимости от расхода солевого порошка при различных временах

ввода реагента и различных схемах его засева. Ввод реагента в облако производится на 15 минуте со времени его образования в слой толщиной 200 м в основании облака на высоте 800 м. Горизонтальные размеры области воздействия по центру моделируемого облака варьировались в пределах от 400 до 2000 м.

Результаты численного моделирования показывают, что 15 мин после начала формирования облака – оптимальное время для введения реагента в облако. При отклонении времени ввода реагента в облако от оптимального на 5 мин (опережения или запаздывания) эффект воздействия значительно снижается. При расходах порошка более 24 кг на облако наибольший положительный эффект воздействия (наибольшее количество дополнительных осадков) реализуется при засеве основания облака порошком на площади с размерами порядка 1 км, совпадающей с областью восходящих воздушных потоков на нижней границе облака.

В целом по результатам проведенных расчетов можно заключить, что использование 3-мерной численной модели конвективного облака позволяет исследовать основные закономерности эффекта воздействия гигроскопическими реагентами на конвективное облако и получать рекомендации по методике проведения воздействий.

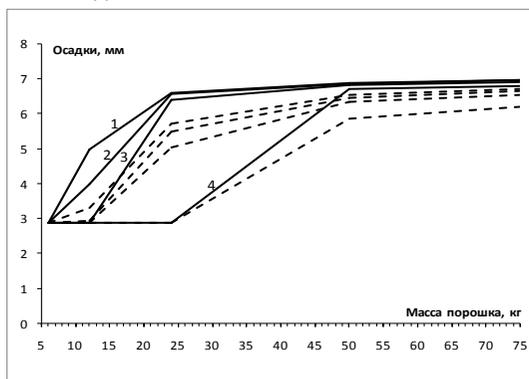


Рис.5. Осадки из облака мощностью 4,2 км при воздействии соевым порошком. Штриховые кривые – при времени ввода реагента, отличающегося от оптимального на ± 5 мин. (1 – площадь засева 400 м × 400 м; 2 – 800 м × 800 м; 3 – 1200 м × 1200 м; 4 – 2000 м × 2000 м)

Список литературы

1. Беляева М.В., Дрофа А.С. Численное моделирование конвективного облака с параметризованным описанием микрофизики // Тезисы всероссий-

ской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. - Нальчик, 24-28 октября 2011. - С.12-15.

2. Довгальюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С. и др. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II. Микрофизический блок модели // Тр. ГГО. С-Пб. 2010. Вып. 562. - С.7-39.

3. 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.

4. Дрофа А.С., Ераньков В.Г., Иванов В.Н., Шилин А.Г., Яскевич Г.Ф. Экспериментальные исследования эффективности воздействия солевыми порошками на конвективное облако для увеличения осадков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т.49. №3. С.327-335.

5. Kessler E. On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation // Meteorological Monographs, 10, N. 32. American Meteorological Society, Boston, 1969. - 84 pp.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ОСАДКОВ ИЗ СЛОИСТООБРАЗНЫХ ОБЛАКОВ САМОЛЕТНЫМИ АЭРОЗОЛЬНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ И ПИРОПАТРОНАМИ

А.В. Клейменова, Б.П. Колосков, Б.Н. Сергеев, А.В. Частухин

АНО «Агентство АТТЕХ», г. Москва

Введение

В настоящее время в мировой практике активных воздействий (АВ) на облака с целью регулирования осадков широко используются самолетные аэрозольные генераторы и пиропатроны.

Для исследования изменения режимов осадков и работы самолетных аэрозольных генераторов и пиропатронов при различных метеоусловиях была разработана трехмерная численная модель «Seeding», позволяющая проводить численное моделирование слоистообразных облаков и выпадающих из них осадков с помощью наземных генераторов AgI, твердой углекислоты CO₂, пиропатронов и самолетных пирогенераторов, а также самолетных азотных генераторов.

В представленной работе приводится описание модели «Seeding» и полученные с ее помощью результаты численных экспериментов по засеву слоистообразных облаков с самолёта с использованием самолетных аэрозольных генераторов САГ-26 и пиропатронов ПВ-26 с йодистым серебром.

Описание численной модели

Численное моделирование активных воздействий с целью регулирования осадков выполнялось с помощью мезомасштабной трехмерной модели, в которой учитывается рельеф местности. Модель предназначена для масштабов от нескольких десятков до нескольких сотен километров. В модели используется диагностическое поле скорости ветра. В качестве первого приближения для скорости ветра формируется трехмерное поле, которое может быть получено путем интерполяции в узлы сетки радиозондовых данных, либо данных численного прогноза или диагноза. Поля давления, температуры и влажности для свободной атмосферы определяются аналогичным образом путем интерполяции.

Неоднородный рельеф местности вызывает появление вертикальных движений в набегающем потоке и при определенных условиях блокирует поток, заставляя его обтекать возвышенности. Влияние этих факторов на поле скорости ветра учитывается в параметризованном виде [4]. В результате горизонтальные составляющие скорости ветра оказываются несогласованными с вертикальной составляющей скорости в смысле сохранения массы. В связи с этим применяется итерационная процедура минимизации дивергенции.

В модели характеристики атмосферного пограничного слоя рассчитываются на основе метода энергетического баланса [3]. В качестве исходных данных используются данные наземных метеорологических наблюдений. Высота пограничного слоя при различных стратификациях температуры определяется с помощью процедур, описанных в [4]. Вертикальные профили скорости, температуры и влажности, а также характеристики турбулентной диффузии в пограничном слое рассчитываются с применением теории подобия и эмпирических формул [4].

Модель предназначена для численного моделирования слоистообразных облаков и выпадающих из них осадков. Если облачность связана с крупномасштабными циклоническими процессами, то в слое облаков задаются вертикальные восходящие движения. Описание развития облаков и осадков в модели основывается на методах параметризации, представленных в работах [5,6]. В ходе моделирования рассчитывается

эволюция полей водности, концентрации ледяных кристаллов, ледности, водности дождя, ледности снега. Предполагается, что частицы облаков и осадков имеют обобщенное гамма-распределение по размерам.

Образование облачных ледяных кристаллов происходит в зависимости от температуры согласно кривой активации Купера (Cooper) [2]. Кристаллы зарождаются также при замерзании облачных капель согласно [1]. В категорию снега переводятся ледяные кристаллы, диаметр которых превышает 200 мкм. Образование дождевых капель в результате коагуляции крупных облачных капель параметризуется с помощью процесса автоконверсии [7]. Дождевые капли образуются также из снежинок и частиц крупы при пересечении ими нулевой изотермы.

В модели рассматриваются следующие основные процессы роста и испарения частиц облаков и осадков. Облачные и дождевые капли увеличиваются в размерах за счет диффузионного роста при пересыщении относительно воды. Дождевые капли растут, захватывая облачную воду. Облачные и дождевые капли испаряются при недосыщении относительно воды. Ледяные кристаллы и снежинки испытывают диффузионный рост, если имеется пересыщение водяного пара относительно льда. При недосыщении эти частицы испаряются. Снежинки растут при захвате облачных капель.

При моделировании воздействия помимо поля концентрации облачных ледяных кристаллов используется также отдельное поле концентрации кристаллов, образовавшихся в результате воздействия. Если моделируется воздействие падающими гранулами CO_2 или азотным генератором, образующиеся ядра кристаллизации становятся непосредственным источником ледяных кристаллов. При моделировании воздействий, в которых генерируются частицы AgI, добавляется еще одно отдельное поле концентрации этих частиц и рассчитывается их перенос. Активация частиц AgI происходит при наличии подходящих условий, и только тогда они переводятся в разряд ледяных кристаллов, образовавшихся в результате воздействия.

При моделировании самолетных способов воздействия рассчитываются траектории полета самолетов, и выпуск реагентов по времени в соответствии с их реальными расходами.

При численном моделировании активных воздействий сначала рассчитывается естественное развитие слоистообразного облака и осадков. Важной частью этого расчета является инициализация облака и осадков. На этом этапе расчета происходит относительное установление полей основных характеристик облачности и осадков. Для установления полей

обычно достаточно 2-3 часов эволюции. Расчет столь длительной эволюции облачности и осадков в области ограниченного размера требует особого подхода к заданию граничных условий на боковых границах области. Необходимо, чтобы процесс установления захватывал не только внутреннюю часть области, но также и границы области, поэтому на этапе инициализации на боковых границах ставятся циклические граничные условия. После завершения этапа инициализации облака и осадков продолжается расчет их относительно устойчивой эволюции, обычно в течение нескольких часов. Для этой части расчета ставятся условия открытых границ. В тех местах границы, где воздух втекает в область, задаются значения полей, рассчитанных в ходе инициализации. Результаты этого расчета обеспечивают надежную основу для сравнения с результатами расчета активного воздействия. Момент начала воздействия выбирается по результатам расчета естественной эволюции облака и осадков, когда временные изменения их характеристик становятся относительно небольшими.

Результаты численного моделирования

Для иллюстрации возможностей численной модели «Seeding» ниже приводятся результаты численных экспериментов, проведенных для случая слоистообразной облачности, наблюдавшейся в районе г. Москвы 25 марта 2013 г. Для проведения расчетов использовались наземные данные о температуре, влажности воздуха, направлении и скорости ветра, и данные радиозондирования атмосферы, полученные на метеостанции в г. Долгопрудный (рис.1).

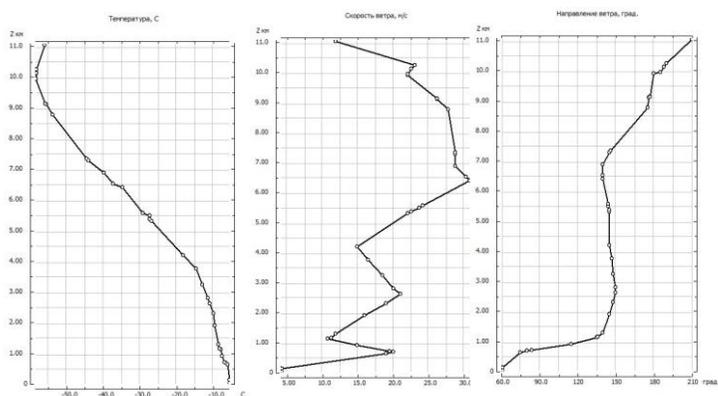


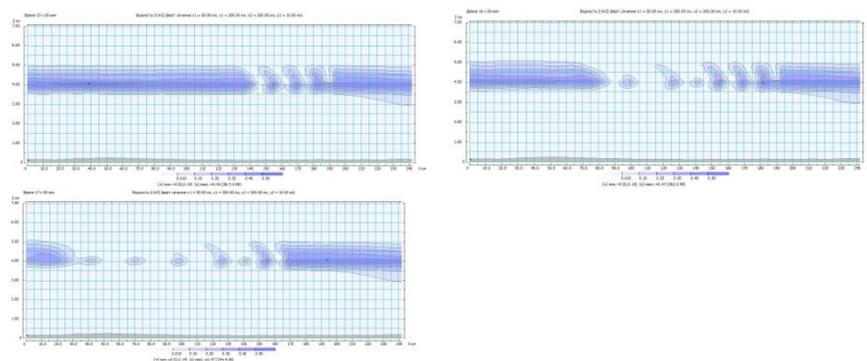
Рис.1. Данные радиозондирования атмосферы в 12:00, 25/03/2013, г. Долгопрудный.

Расчеты проводились при воздействии на слоистообразную облачность самолетными пиротехническими аэрозольными генераторами САГ-26 и пиропатронами ПВ-26.

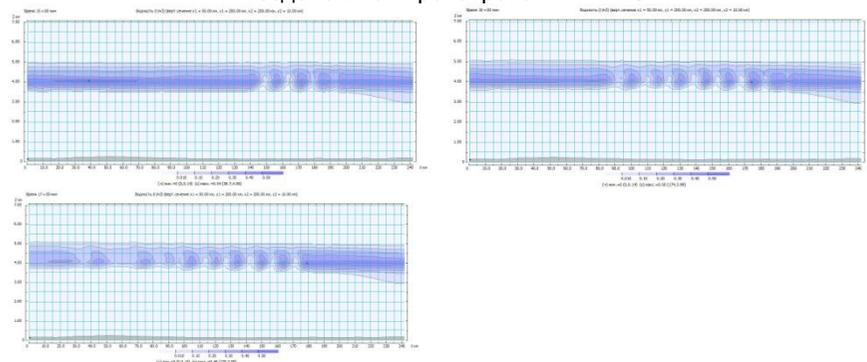
Воздействия проводились с одинаковым расходом реагента при полёте самолёта на высоте 4,5 км (температура – 20°C).

В качестве примера на рис.2 приведены результаты расчетов водности (г/м^3) в вертикальном сечении через 1,2 и 3 часа после начала воздействий генераторами САГ-26 и пиропатронами ПВ-26.

Воздействие генераторами САГ-26



Воздействие пиропатронами ПВ-26



Через 1 час

Через 2 часа

Через 3 часа

Рис.2. Водность (г/м^3) в вертикальном сечении через 1, 2 и 3 часа после начала воздействий генераторами САГ-26 (а) и пиропатронами ПВ-26 (б).

На рис.3 приведены результаты расчетов концентрации кристаллов (1/л) в вертикальном сечении через два часа после начала воздействий генераторами САГ-26 и пиропатронами ПВ-26.

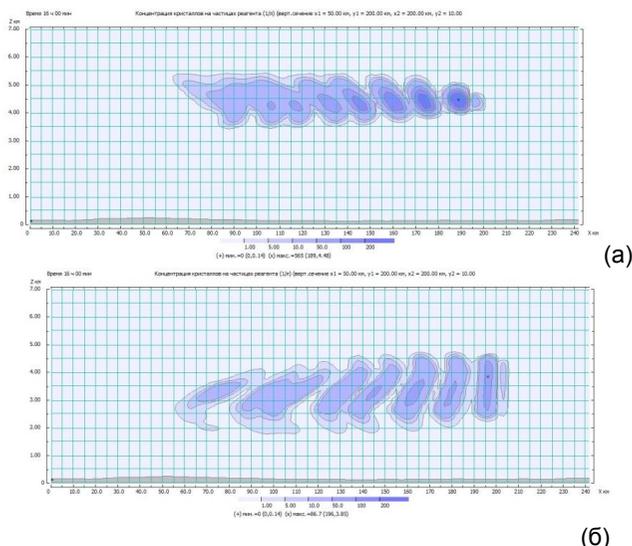


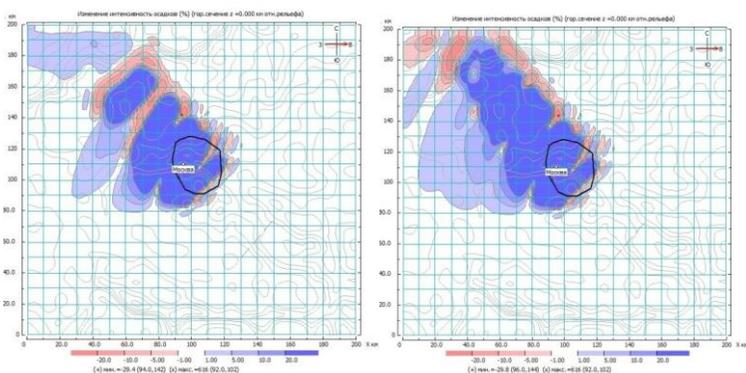
Рис.3. Концентрация кристаллов (1/л), образовавшихся через 2 часа после начала воздействий генераторами САГ-26 (а) и пиропатронами ПВ-26 (б).

Приведенные на рисунках результаты численных расчетов показывают наличие существенных различий в проработке слоистообразного облака при воздействии генераторами САГ-26 и пиропатронами ПВ-26. Различия в характере вертикальных распределений водности и ледяных кристаллов обусловлены различиями в распределении по высоте образовавшихся в ходе воздействия ледяных кристаллов. Так, в случае воздействия генераторами, когда реагент распространяется на уровне полёта самолёта, максимум концентрации ледяных кристаллов располагается в слое водности. В случае воздействия пиропатронами, когда реагент распространяется в 1,5-2-километровом слое ниже уровня полёта самолёта, ледяные кристаллы распределяются не только в слое водности, но и под ним в значительно большем по мощности слое.

На рисунках 4 и 5 приведены результаты расчетов изменения интенсивности осадков (%) через 2 и 3 часа после начала воздействий генераторами САГ-26 и пиропатронами ПВ-26.

Из приведенных рисунков видно, что при воздействии генераторами на слоистообразную облачность, наблюдавшуюся в районе Москвы 25 марта 2013 г., наблюдается большой эффект увеличения интенсивности осадков и их площади, чем при воздействии пиропатронами ПВ-26.

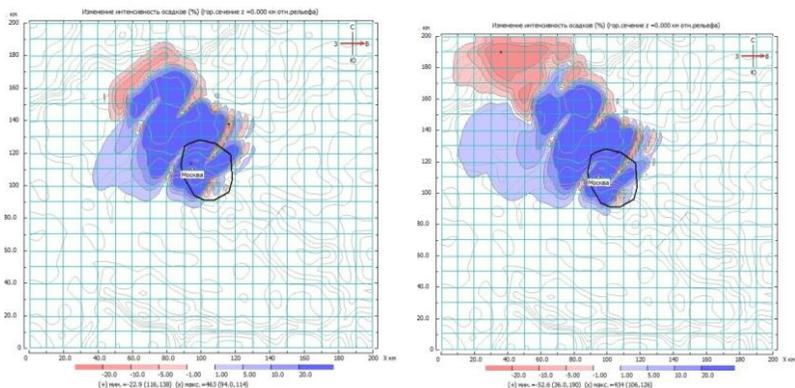
Таким образом, приведенные в докладе результаты численных экспериментов наглядно иллюстрируют возможности и перспективы использования созданной в «Агентстве АТТЕХ» трёхмерной численной модели “Seeding” для анализа эффективности воздействий самолетными генераторами и пиропатронами на слоистообразные облака с целью увеличения или уменьшения осадков в зависимости от конкретных метеоусловий и решаемых задач.



Через 2 часа

Через 3 часа

Рис.4. Изменение интенсивности осадков (%) через 2 и 3 часа после начала воздействий генераторами САГ-26.



Через 2 часа

Через 3 часа

Рис.5. Изменение интенсивности осадков (%) через 2 и 3 часа после начала воздействий пиропатронами ПВ-26.

Список литературы

1. Bigg E. K. The supercooling of water//Proc. Phys. Soc. London, 1953. B.66. P. 688–694.
2. Cooper W. A. Ice initiation in natural clouds. Precipitation Enhancement//A Scientific Challenge, Meteor. Monogr. Amer. Meteor. Soc. 1986. No. 43. P. 29–32.
3. Holtslag A.A.M., van Ulden A.P. A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data//J. Clim. and Appl. Meteorol. 1983. V.22. P. 517-529.
4. Scire J.S., Robe F.R., Fernau M.E., Yamartino M.J. A user's guide for the CALMET meteorological model (Version 5)//Earth Tech. Inc., Concord, MA, 2000.
5. Thompson G., Rasmussen R. M., Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis//Mon. Wea. Rev. 2004. N. 132. P. 519–542.
6. Thompson G., Rasmussen R. M., Manning K. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization//Mon. Wea. Rev. 2008. N. 136. P. 5095–5115.
7. Walko R. L., W. R. Cotton, M. P. Meyers, Harrington J. Y. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single-moment scheme//Atmos. Res. 1995. N. 38. P. 29–62.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОНВЕКТИВНЫЕ ОБЛАКА ГИГРОСКОПИЧЕСКИМИ И ЛЬДООБРАЗУЮЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Р.С. Пастушков^{1,2}

¹ *ФГБУ Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный,*

² *Московский физико-технический институт, г. Москва*

В настоящее время разрабатываются и используются в исследовательской и практической работе несколько отечественных моделей конвективных облаков и осадков [1-9]. Большинство из них ориентировано на проведение как исследовательских работ, так и на оценку

возможных результатов активных воздействий. Наиболее пригодной для оперативного использования можно считать полуторамерную модель [4].

Настоящая модель является развитием ранее разработанной модели тёплых конвективных облаков и осадков [6].

Двумя основными отличительными особенностями предлагаемой модели являются:

— ориентация на оперативное использование в практике активных воздействий в классе 3D-моделей и, как следствие, минимизация требований к вычислительным ресурсам (в первую очередь, к вычислительному шагу по времени),

— рассмотрение на современном уровне микрофизических процессов, наиболее влияющих на осадкообразование, особенно при моделировании активных воздействий.

Основой гидродинамического блока модели является приближение Буссинеска. Это приводит к необходимости решать на каждом временном шаге трёхмерное уравнение Пуассона для возмущения поля давления. Однако вычислительные издержки на эту процедуру окупаются возможностью использования при этом временных шагов, определяемых скоростями воздуха, что даёт многократный выигрыш по отношению к моделям, в которых этот шаг лимитируется скоростями звука [2,3]. Кроме того, и само по себе поле давления в зоне развития конвекции достаточно информативно.

Отметим, однако, что уравнение Пуассона для поля давления является следствием уравнения неразрывности, и тем самым в неявном виде обеспечивает сохранение массы всей рассматриваемой части атмосферы. Это обстоятельство накладывает довольно жёсткие требования к точности решения этого уравнения.

Турбулентный обмен в зоне развития облачной конвекции моделируется в K -приближении при наличии постоянного фонового коэффициента турбулентности, определяемого по закону Ричардсона—Обухова с заданием характерного масштаба турбулентных вихрей, как правило, пропорционального размерам пространственной сетки модели. Переменные в пространстве и времени возмущения этого коэффициента определяются деформацией поля скоростей.

Учтённые в модели микрофизические процессы представлены на рис.1. Знаками N с соответствующими индексами обозначены концентрации, знаками Q — удельные содержания. В скобках под названием микрофизических процессов приведены изменяющиеся при этом параметры.

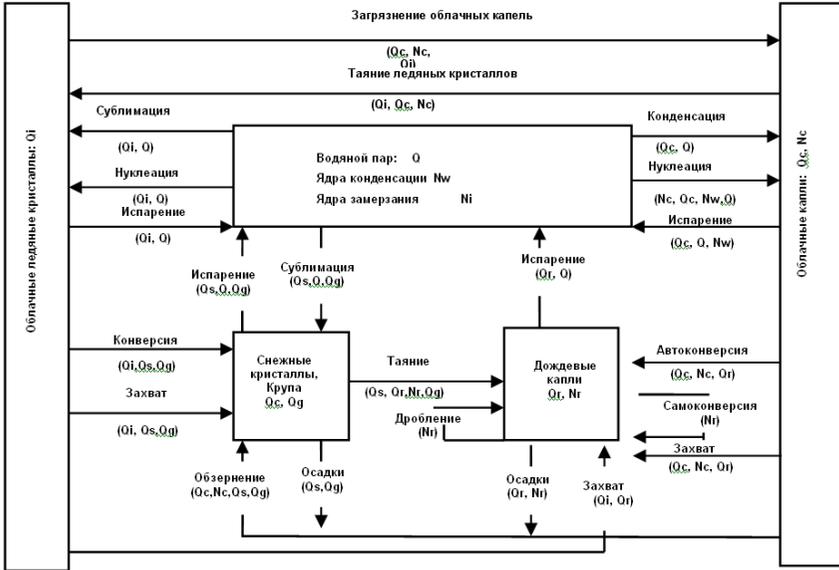


Рис. 1. Блок-схема микрофизических процессов модели.

Основой этого блока модели является предположение о возможности использования следующих спектров (функций распределений) гидрометеоров модели:

1. Спектры облачных и дождевых капель (их функции распределения по объёмам)

$$n_d(V) = \frac{N_d (v_d + 1)^{v_d + 1}}{\Gamma(v_d + 1) V_{0d}} \left(\frac{V}{V_{0d}} \right)^{v_d} \exp \left[- (v_d + 1) \left(\frac{V}{V_{0d}} \right) \right]. \quad (1)$$

Здесь N_d – концентрация капель (N_c – облачных, N_r – дождевых); V_{0d} – средние объёмы капель (V_{0c}, V_{0r}); v_d – параметры форм гамма-распределений (v_c, v_r); $\Gamma(v_d + 1)$ – гамма-функция.

Эквивалентные гамма-распределения облачных и дождевых капель по радиусам в этом случае имеют вид

$$n_d(r) = \frac{3N_d (v_d + 1)^{v_d + 1}}{\Gamma(v_d + 1) r_{0d}} \left(\frac{r}{r_{0d}} \right)^{3v_d + 2} \exp \left[- (v_d + 1) \left(\frac{r}{r_{0d}} \right)^3 \right]. \quad (2)$$

Наряду с (2) могут быть использованы Γ -распределения по радиусам вида [10]

$$n_d(r) = \frac{N_d}{\Gamma(\gamma_d + 1)\beta_d} \left(\frac{r}{\beta_d}\right)^{\gamma_d} \exp\left(-\frac{r}{\beta_d}\right). \quad (3)$$

Здесь β_d, γ_d – параметры распределений (β_c, γ_c – для облачных, β_r, γ_r – для дождевых капель).

2. Спектры снежных кристаллов (их функции распределения по диаметрам D)

$$n_s(D) = N_{0s} \exp\left(-\frac{\lambda_s}{D}\right), \quad \lambda_s = \left(\frac{\pi\rho_s N_{0s}}{\rho Q_s}\right)^{1/4}, \quad N_{0s} = 0.1 \text{ см}^{-4} \quad (4)$$

3. Спектры частиц крупы (их функции распределения по диаметрам D)

$$n_g(D) = N_{0g} \exp\left(-\frac{\lambda_g}{D}\right), \quad \lambda_g = \left(\frac{\pi\rho_g N_g}{\rho Q_g}\right)^{1/3}, \quad N_{0g} = \lambda_g N_g \quad (5)$$

4. Функции распределения облачных ядер конденсации по пересыщениям над водой S_w

$$n_w(S_w) = C(z)(S_w)^{k_w} \quad (6)$$

5. Функции распределения сублимационных ядер льдообразования по пересыщениям надо льдом S_i

$$n_i(S_i) = C_i \left(\frac{S_i}{S_0}\right)^{k_i} \quad (7)$$

Значения эмпирических констант из (6), (7) [10]: $k_w = 0.2 - 2.0$, $k_i = 3.0 - 8.0$, $C_i = e^{2\pm 1} \text{ см}^{-3}$, $S_0 = 0.16$

Основным преимуществом использования таких распределений при разработке моделей облаков и осадков является то обстоятельство, что в этом случае все микрофизические процессы благодаря возможности точного вычисления любых моментов этих распределений обычно описываются в терминах интегральных облачных характеристик (водности и концентрации облачных и дождевых капель). Сопровождающий основной недостаток, естественно, обусловлен необходимостью включения в спектры капель нереально больших размеров (вплоть до бесконечно больших). Как следствие, возникают задачи о слежении за тем, чтобы вклады этих нереально больших

капель в их интегральную концентрацию, водность и последующие моменты были бы пренебрежимо малыми. Наиболее чувствительна к этому аспекту, естественно, радиолокационная отражаемость (шестой момент функции распределения дождевых капель).

В любых случаях выбор значений указанных параметров делается на основе эмпирических данных. При этом могут быть использованы как довольно мягкие условия (например, только совпадение в некотором смысле наблюдаемых и теоретических функций распределений), так и довольно жёсткие (например, разумное поведение моментов функций распределений третьего и более высокого порядков). Одним из выходных параметров разработанной модели является радиолокационная отражаемость (шестой момент от функции распределения). В разработанной версии модели использовались распределения (1). Поэтому выбор значений v_r производился с учётом этого обстоятельства таким образом, чтобы вычисляемые значения радиолокационной отражаемости были бы обусловлены дождевыми каплями реально существующих размеров. Проведённые расчёты показали, что приемлемыми значениями параметров форм Γ -распределений облачных и дождевых капель могут быть взяты $v_c = 0, v_r = -0.6, -0.8$.

Наиболее тщательно в модели проработаны алгоритмы расчёта зарождений облачных капель и ледяных кристаллов, играющие ключевые роли при моделировании активных воздействий гигроскопическими и льдообразующими веществами. Зарождение ледяных кристаллов в результате замерзания облачных капель рассматривается в двух принципиально разных режимах — гомогенном и гетерогенном [12,13]. Такой подход способствует повышению точности расчёта активных воздействий льдообразующими веществами.

Численный алгоритм модели основан на использовании метода расщепления по физическим процессам. Он даёт возможность построить консервативную модель второго порядка аппроксимации, и, выделив процессы переноса (гиперболическую часть системы уравнений), придать получаемым решениям свойств монотонности [11], а для положительно определённых параметров, таких как концентрации и удельные значения, кроме того и неотрицательности.

Список литературы

1. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Моделирование конвективной облачности и её влияния на газовый состав атмосферы//Изв. РАН, ФАО. - 2010. - Т. 46, № 6. - С. 771–765.

2. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А., Игнатьев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С. Базовая численная трёхмерная модель осадкообразующего конвективного облака//Доклады всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 24–28 октября 2011г./под ред. Л.М. Федченко, М.Т. Абшаева, Х.М. Калова.- Нальчик: ООО «Печатный двор», 2013. - С. 25–31.

3. Владимиров С.А., Пастушков Р.С. Опыт использования базовых блоков ГГО для построения численной модели проведения и оценки результатов активных воздействий на конвективные облака гигроскопическими и льдообразующими веществами с целью получения дополнительных осадков//Доклады всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 24–28 октября 2011г./под ред. Л.М. Федченко, М.Т. Абшаева, Х.М. Калова.- Нальчик: ООО «Печатный двор», 2013. С. 37–41.

4. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синкевич А.А. Применение полуторазмерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. С-Пб.: изд-во ГГО, 2007. 162 с.

5. Дрофа А.С. Исследование воздействия гигроскопическими частицами на конвективное облако по результатам численного моделирования //Изв. РАН, ФАО. 2010. Т. 46. № 3. С.1–11.

6. Евдокимова С.Р., Пастушков Р.С. Параметризационная модель тёплых конвективных облаков и осадков. Активные воздействия на гидрометеорологические процессы // Тр. Всесоюзной конференции. Киев, 17–21 ноября 1987 г. - Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 21–26.

7. Жекамухов М.К., Абшаев А.М. Моделирование ракетного засева конвективных облаков гигроскопическим аэрозолем 1. Конденсационный рост облачных капель//Метеорология и гидрология. 2009. №4. С. 54–66.

8. Пастушков Р.С. Численное моделирование активных воздействий на конвективные облака: актуальные направления, нерешённые задачи, возникающие вопросы//Доклады всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 24–28 октября 2011г./под ред. Л.М. Федченко, М.Т. Абшаева, Х.М. Калова.- Нальчик: ООО «Печатный двор», 2013. С. 17–21.

9. Шаповалов В.А. Численное моделирование формирования макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков / Автореферат дис., ВГИ, Нальчик. 2011. 14 с.

10. Численное моделирование облаков/под ред. Мазина И.П., Сергеева Б.Н. - М.: Гидрометеиздат, 1984. 165с.

11. Холодов А. С., Холодов Я.А. О критериях монотонности разностных схем для уравнений гиперболического типа//Журнал вычислительной математики и математической физики. 2006. Т. 6. № 49. С. 1638–1667.

12. Чукин В.В., Павленко Е.А., Платонова А.С. Скорость гомогенного образования ледяных ядер в переохлаждённых каплях водных растворов //Метеорология и гидрология. 2010. № 8. С. 33–40.

13. Barahona D., Nenes A. Parameterizing the competition between homogeneous and heterogeneous freezing in cirrus cloud formation – monodisperse nuclei//Atmos. Chem. Phys. 2009. № 9. P. 1–13.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Последние десятилетия характеризуются бурным развитием трехмерной компьютерной графики практически во всех сферах деятельности людей, будь то: игры, тренажеры, геология, наука, космос и др. В частности, быстрыми темпами развивается и внедряется в практику трехмерное представление информации метеорологических радиолокаторов, трехмерная графика для изображения результатов моделирования и т.д. [3-7].

В ВГИ на основе открытой библиотеки OpenGL разработано оригинальное программное обеспечение трехмерной графики, которое способствует более качественной интерпретации широкого спектра геофизической информации и данных моделирования. В данной работе представлены некоторые возможности разработанного авторами программного обеспечения (ПО) трехмерной (3D) визуализации.

Подобраны 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 этот массив содержит информацию о каждой точке трехмерного пространства. Применяются общие программные решения по повышению эффективности работы.

Программное обеспечение визуализации радиолокационной метеорологической информации позволяет получить новые представления о мощных грозовых облаках, их структуре, взаимодействии развивающихся конвективных ячеек. В частности, построение трехмерного изображения облака в виде изоповерхностей радиолокационной отражаемости дает возможность увидеть облако как объемный объект (рис.1), оценить его особенности, проследить связь с орографией. Значение этих возможностей, ставших доступными в последние годы, весьма существенно.

Авторами разработаны программы отображения метеорологических объектов на трехмерной поверхности земли (рис.2,3). Радиолокационные данные при отображении соотносятся с положением и размерами относительно координат радиолокационной станции и привязаны к области вывода. Шкала уровней отражаемости дает возможность изменять внешний порог отображения и последовательно просматривать положение вложенных уровней или увидеть все уровни одновременно, например, в вертикальном или горизонтальном разрезе облака (рис.2). Нанесение дополнительных слоев геоинформационных данных позволяет выводить вспомогательную информацию.

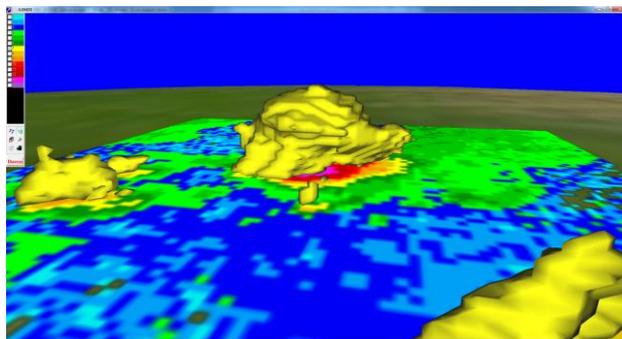


Рис.1.Трехмерное изображение грозового облака по результатам наблюдений автоматизированным радиолокатором МРЛ-5. Приведены изоповерхности уровня радиолокационной отражаемости 30 dBZ на фоне карты максимальной отражаемости Z_{max} .

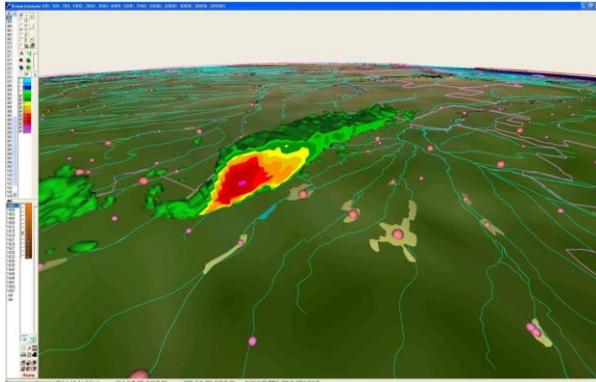


Рис.2.Вертикальный разрез по направлению движения облака в 3D представлении на фоне векторной карты местности.

Интересным и полезным с точки зрения активных воздействий (АВ) на облака представляется анализ взаимодействия ячеек на ранней стадии. Это позволяет выделить наиболее интенсивно развивающиеся грозовые ячейки и начать воздействие в нужном месте без опоздания. Выделение быстро развивающихся грозовых ячеек на ранней стадии позволит сосредоточить средства АВ именно на них.

Трехмерное представление радиолокационной информации позволяет взглянуть на объекты АВ и адаптировать метод с учетом анализа взаимодействия ячеек. Эффект АВ может быть повышен за счет использования 3D технологии отображения РЛС информации, в частности, за счет разработки метода фильтрации взаимодействующих ячеек на ранней стадии.

На рис.4 представлена трехмерная визуализация радиолокационной отражаемости в виде текстур с наложенными данными о грозовых разрядах, зарегистрированных грозорегистрационной системой LS8000 за интервал времени радиолокационного обзора (3,5 мин.).

Разработанное ПО трехмерной визуализации используется также для интерпретации результатов моделирования и отладки численных моделей конвективных облаков, развиваемых в Высокогорном геофизическом институте. На рис. 5-9 приведены трехмерные результаты расчетов по модели конвективного облака с учетом электрических процессов [1,2].

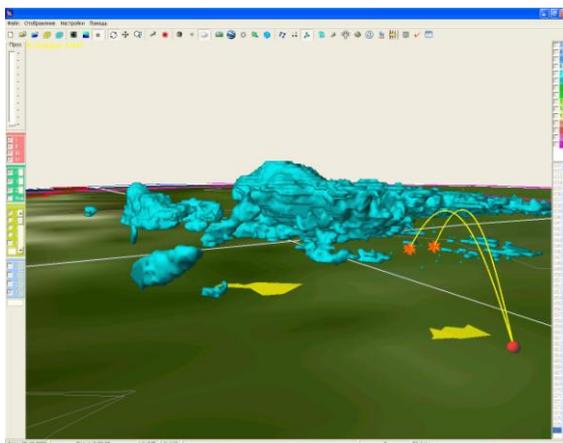


Рис.3. Суперячейковое градовое облако с соседствующими объектами в трехмерном виде. Представлены также траектории противораковых ракет с наземного пункта воздействия.

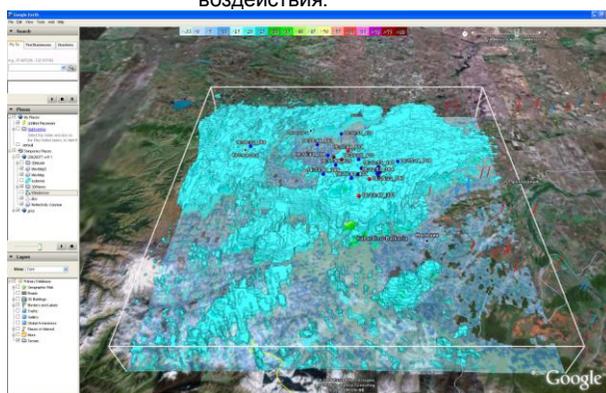


Рис.4. Трехмерное изображение облаков текстурами в выделенной области средствами Google Earth, совмещенное с данными грозорегистратора LS8000 (цветные шарики).

Программное обеспечение трехмерной визуализации данных численного моделирования позволяет:

- осуществлять трехмерные повороты и вращение сцены, приближать и отдалять ее;
- изображать параметры модельного облака изолиниями в вертикальных и горизонтальных его сечениях;

- отображать изоповерхности расчетных параметров (водность, ледность, радиолокационная отражаемость и др);
- отображать векторное поле стрелками;
- выводить одновременно несколько параметров, что повышает возможности исследователя по физической интерпретации результатов расчетов.

Следует отметить, что с появлением оригинального ПО трехмерной графики математическое моделирование конвективных облаков в ВГИ поднялось на новый качественный уровень.

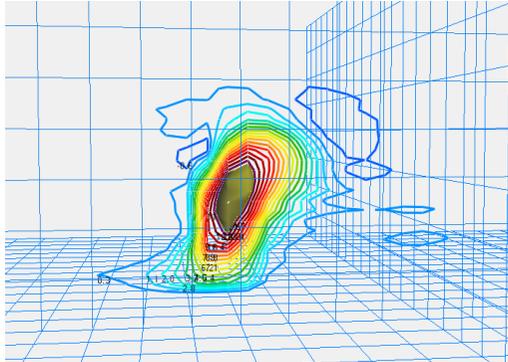


Рис.5. Изолинии восходящих и нисходящих потоков в вертикальной плоскости через облако. Сплошная поверхность в центре - изоповерхность $W=13$ м/с.

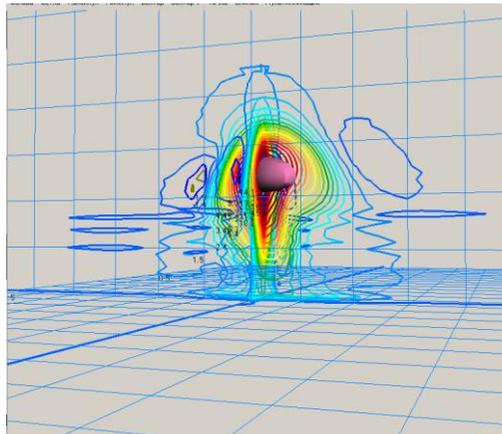


Рис.6. Изоповерхность радиолокационной отражаемости 55 dBZ (поверхность), совмещенная с изолиниями скорости вертикальных потоков в плоскостях ZX и ZY.

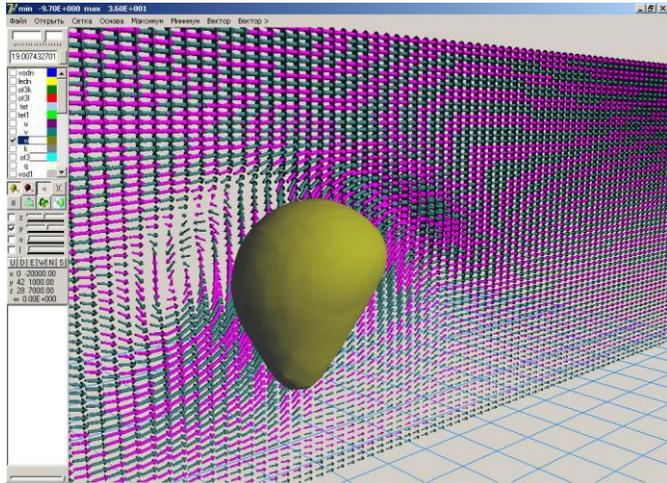


Рис.7. Представление данных численного моделирования, вихрь с наветренной стороны восходящего потока в облаке. Стрелками показано движение воздуха, изоповерхность - восходящий поток более 10 м/с.

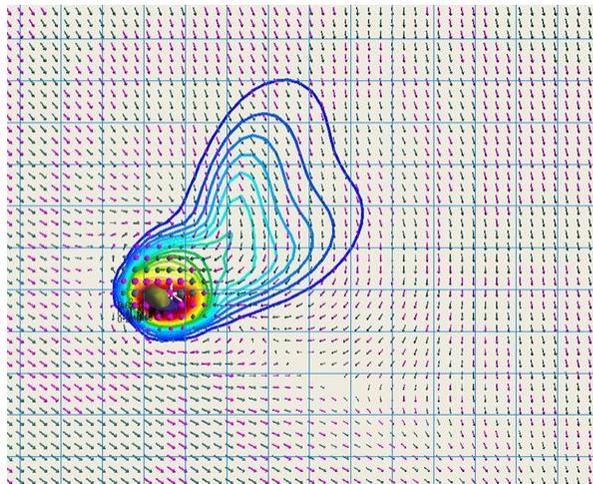


Рис.8. Поле горизонтального ветра вокруг облака на уровне Z=3.8 км.

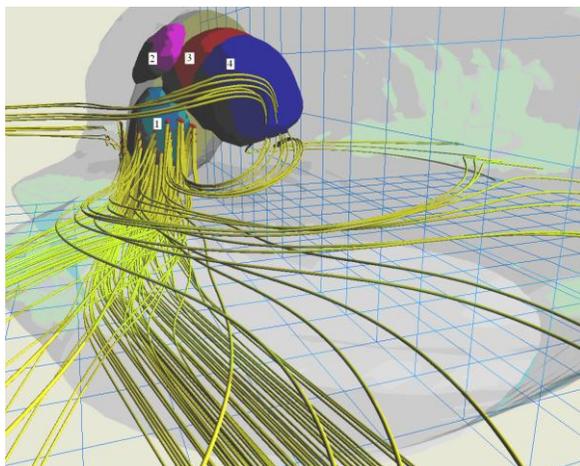


Рис.9. Визуализация потоков в грозном облаке (линии тока для одномерного поля скоростей): 1 – изоповерхность водности; 2,3,4 – изоповерхности мелких, средних и крупных ледяных частиц. Полупрозрачной изображена радиолокационная изоповерхность 10 dBZ.

Заключение

Разработано адаптированное для задач физики облаков и АВ на них программное обеспечение трехмерной визуализации метеорологической радиолокационной информации, данных математического моделирования и другой трехмерной информации.

Разработанное ПО позволяет эффективно интерпретировать результаты полевых наблюдений грозоградовых облаков дистанционными средствами, данные численных экспериментов на основе трехмерных моделей.

Программа 3D визуализации отличается удобством и развитой функциональностью. Трехмерные сцены представляют информацию в таком виде, который облегчает пользователю сформировать представление об объемных характеристиках метеорологического объекта. Программа визуализации позволяет выделять взаимодействующие конвективные ячейки на ранней стадии для целей АВ.

Список литературы

1. 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.

2. Ашабоков Б.А., Бейтуганов М.Н., Куповых Г.В., Шаповалов А.В., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков//Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. – 2012, №6. - С. 65-68
3. <http://www.grlevelx.com>
4. <http://wxanalyst.com/radar/>
5. <http://www.iz3mez.it/wp-content/library/ebook/3D> Visualization of Weather Radar Data-A. Ernvik 2002 WW.pdf
6. http://www.gematronik.com/fileadmin/media/pdf/ProductDatasheet/Tech_Leader_engl_1204120716.pdf
7. <http://www.vaisala.com/en/products/weatherradars/Pages/WRM100.aspx>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО АЭРОЗОЛЯ НА РАЗВИТИЕ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА

**А.А. Синькевич, Ю.А. Довгальюк, Н.Е. Веремей, А.Б. Куров,
Н.И. Баранова**

ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

Введение

В настоящее время численные модели конвективных облаков являются мощным инструментом исследования их эволюции, в том числе исследования влияния различных факторов на их развитие. В частности, с помощью численных моделей можно исследовать влияние аэрозольного состава атмосферы (концентрации, физико-химического состава и др.) на динамические и микрофизические процессы в облаках.

Влияние anomalно повышенных концентраций аэрозолей на характеристики облаков неоднозначно. Даже непосредственное воздействие на микроструктуру облаков будет зависеть не только от концентрации аэрозольного вещества, но и от его местонахождения, физико-химических свойств, времени существования повышенной концентрации [7].

Термин «повышенная концентрация» применяется в случаях, когда заметно уменьшается оптическая дальность видимости [13]. Пересчет последней на массовую концентрацию аэрозоля по эмпирическим формулам дает

порядок величины $10^{-2} \div 10^0$ г/м³. Фоновые значения концентрации аэрозоля существенно зависят от физико-географических условий, в том числе от близости к крупным городам. Характерный порядок этих значений для разных регионов вдали от городов обычно составляет $10^{-5} \div 10^{-3}$ г/м³ [2,7,13].

Исследования с использованием численных моделей облаков показали наличие связи между количеством и свойствами аэрозольных частиц с динамикой облаков. В теоретической работе [18] показано, что увеличение концентрации ядер конденсации в облаках мощной конвекции приводит к увеличению скорости восходящих потоков и количества осадков. Авторы выделяют особое влияние скрытой теплоты фазовых переходов на динамику облака в зависимости от концентрации аэрозоля. Масса воздуха (морская, континентальная) также оказывает заметное влияние на зависимость параметров облака от концентрации аэрозолей [15]: для континентальных облаков конвекция оказывается интенсивнее.

В целом можно отметить, что если влияние повышенной концентрации атмосферного аэрозоля, обладающего гигроскопическими свойствами, относительно хорошо изучено, то влияние больших концентраций аэрозольных частиц, имеющих льдообразующие свойства, на характеристики облака, включая осадкообразование и электризацию, пока недостаточно установлено.

Целью данной работы является исследование влияния сильного загрязнения атмосферы пылевым аэрозолем естественного происхождения на характеристики кучево-дождевых облаков и связанных с ними осадков методом численного моделирования. Это влияние исследуется путем анализа развития выбранного кучево-дождевого облака. Данное облако развивалось в юго-западной части Саудовской Аравии (вблизи города Абха) 3 июля 2009 г., когда наблюдалось сильное загрязнение атмосферы аэрозолями естественного происхождения. Краткая климатологическая информация об исследуемом районе приводится в [8,9,11], там же приводятся основные характеристики используемого радиолокатора, работающего на длине волны 5,35 см. При анализе информации также привлекались данные спутника "Meteosat-8" и наземной сети (метеорологические параметры и параметры аэрозоля). Для моделирования развития облака применялась численная нестационарная трехмерная модель конвективного облака. Выбор трехмерной модели обусловлен тем, что глубокая конвекция, как правило, характеризуется существенной пространственной неоднородностью.

1. Краткие сведения о состоянии приземного слоя атмосферы

По данным метеорологических наблюдений в г. Абха температура в 06 ч (09 ч. местного времени) составляла 27°C, затем постепенно увеличиваясь достигла максимума (30°C) в 08 ч.

В этот день наблюдатели на метеостанции постоянно регистрировали пыль. В ночные и утренние часы концентрация аэрозоля была очень велика, что привело к уменьшению дальности видимости до 2 км, далее дальность видимости постепенно повышалась, достигнув 6 км в 15 ч (18 ч. местного времени). При этом высокая концентрация пыли наблюдалась и накануне 2 июля, когда метеорологическая дальность видимости также уменьшалась до 2 км.

2. Анализ характеристик облака по радиолокационным и ИК-радиометрическим измерениям

Высота верхней границы исследуемого облака достигла своего максимального значения на 35 минуте развития и составила 14,9 км по радиолокационным данным. Далее высота верхней границы начала уменьшаться, понизившись до 10,4 км на 55 мин, что было связано с постепенным разрушением облака. Отмечается также 2 максимума высоты верхней границы облака на 60 и 80 минутах, что обусловлено развитием новых ячеек.

Радиолокационная отражаемость достигает максимального значения 58 dBZ на 40 минуте развития облака, далее она уменьшается, но отмечается несколько пиков, которые связаны с развитием новых ячеек. Согласно результатам вычислений вероятность наличия градовых частиц превосходит 0,9 в течение 30-40 мин., т.е. в период максимального развития облака по вертикали. Интенсивность осадков по радиолокационным данным достигает максимума равного 42 мм/ч на 50 минуте. Начиная с 100 минуты осадки прекращаются.

Максимальное значение потока осадков, представляющего собой количество осадков, выпадающих из облака в единицу времени, зафиксировано на 40 минуте и равно 617 м³/с.

3. Моделирование развития облака с помощью трехмерной модели

С использованием данных о температурно-влажностном строении атмосферы нами было выполнено численное моделирование эволюции конвективного облака для описанного случая (03.07.2009, Абха) с помощью отече-

ственной полной трехмерной численной модели. Ее детальное описание приведено в работах [5,6]. Данная модель является нестационарной, трехмерной, с параметризованным описанием микрофизических процессов. Она содержит уравнения движения, записанные в форме Навье – Стокса, а также уравнения неразрывности, энергии, переноса водяного пара, облачных капель, дождевых капель, облачных ледяных кристаллов и градин. Система уравнений дополнена параметрическими выражениями для расчета интенсивности микрофизических процессов (фазовых переходов и коагуляции).

Выполнены расчеты по данным радиозондирования атмосферы для г. Абха за 12 ч. ВСВ. Эти расчеты были сделаны для случая фонового содержания аэрозольных частиц. Данный случай здесь и далее будем называть базовым. Результаты расчетов (рис.1, базовый случай) показали, что при данных начальных условиях развивается грозоградное кучево-дождевое облако с высотой верхней границы 10,3 км от подстилающей поверхности, что соответствует 12,3 км над уровнем моря. Максимальное по координатам и по времени значение скорости восходящего потока составило 24 м/с, что характерно для грозоградных облаков. Абсолютные максимумы водности облачных капель, дождевых капель и суммарной ледности составляют 4,2, 3,8 и 6,7 г/м³ соответственно. Максимальные значения интенсивности дождя и града у земли составили 103,8 и 54,2 мм/ч соответственно, суммарное значение интенсивности осадков достигло 157,1 мм/ч. Радиолокационная отражаемость облака достигла 52,9 dBZ.

Сравнивая характеристики облака по результатам моделирования с данными натурных измерений отметим, что максимальная расчетная высота верхней границы облака близка к измеренной. Максимальное значение интенсивности осадков достигло 111 мм/ч, что более чем в 2 раза превосходит реальное значение. Максимальное значение отражаемости достигало 52,9 dBZ, что отличается от измеренного значения (58 dBZ). Это может быть связано с отклонением реального спектра распределения размеров частиц осадков от функции Маршалла-Пальмера, используемой в модели, а также с различием расчетного и реального содержания жидких и твердых осадков. Время существования облаков также различается (в натурном эксперименте 1,5 ч., в расчетах – около 1 ч.). Эти различия свидетельствуют о том, что развитие и диссипация расчетного облака идут быстрее и интенсивнее, чем в реальности. Различия могут быть связаны с особенностями развития натурального облака, которое во многом определялось процессами слияния с фидерными облаками (моделирование влияния последних в модели отсутствует). Однако это не оказывает влияния на возможность использования модели для оценки влияния аэрозоля на характеристики облака.

Рассмотрим влияние повышенной концентрации аэрозоля на эволюцию конвективного облака для двух случаев: гигроскопического и льдообразующего аэрозоля.

Пылевые аэрозольные частицы, в случае, если они являются гигроскопическими, могут проявлять себя как дополнительные ядра конденсации. При их наличии наблюдается перераспределение жидкокапельной влаги между облачными каплями, образовавшимися на фоновых ядрах и на частицах пыли. Это приводит к изменению распределения облачных капель по размерам, а, следовательно, влияет на процесс осадкообразования.

В качестве одного из параметров, характеризующих процесс перехода облачных капель в дождевые, является порог автоконверсии. Это некоторое критическое значение $Q_{с\ крит.}$ водности облачных капель Q_c , по достижении которого начинается переход водности облачных капель в водность осадков. Впервые автоконверсия в параметризованном виде была записана Кесслером в результате анализа экспериментальных данных [14]. Согласно этой работе, характерным диапазоном изменения $Q_{с\ крит.}$ является $0,5-1,0 \text{ кг/м}^3$, а скорость автоконверсии составляет 10^{-3} с^{-1} . При этом Q_c может быть записана через функцию распределения капель по размерам. Тем самым, можно выполнить учет счетной концентрации капель и ее изменение в процессе развития облака. Этот вопрос был рассмотрен в [10] на основании работ Берри [12], а также в [4]. Дальнейшие исследования в данном направлении были проведены в работах [16,17]. Все параметризации, независимо от степени их сложности, отражают физический смысл параметризации Кесслера [14], их различие состоит лишь в том, какой момент функции распределения облачных капель по размерам в них рассматривается. В используемой автоами модели рассматривается третий момент.

Увеличение числа ядер конденсации приводит к увеличению $Q_{с\ крит.}$. С учетом этой закономерности выполнены расчеты по модели для той же стратификации атмосферы, но для разных значений порога автоконверсии. В случае фонового аэрозоля $Q_{с\ крит.} = 0,5 \text{ г/м}^3$, повышенному содержанию аэрозоля соответствуют $Q_{с\ крит.} = 1,5 \text{ г/м}^3$ и $Q_{с\ крит.} = 2,5 \text{ г/м}^3$.

На рис.1 приведен временной ход основных характеристик облака и осадков при разных значениях $Q_{с\ крит.}$ (расчеты для базового случая были выполнены при $Q_{с\ крит.} = 0,5 \text{ г/м}^3$). При увеличении $Q_{с\ крит.}$ для большинства характеристик облака (водность дождевых капель, ледность градин, радио-

локационная отражаемость, интенсивность осадков) максимумы сдвигаются позднее во времени, а их значения уменьшаются. Максимум водности облачных капель также сдвигается позднее во времени, но его значение увеличивается (при $Q_{с.крит.} = 1,5 \text{ г/м}^3$ оно составляет $5,3 \text{ г/м}^3$, а при $Q_{с.крит.} = 2,5 \text{ г/м}^3 - 6,4 \text{ г/м}^3$). Это обусловлено тем, что переход облачных капель в осадки задерживается, и успевает накопиться большее количество облачной влаги. Высота верхней границы облака при этом практически не меняется.

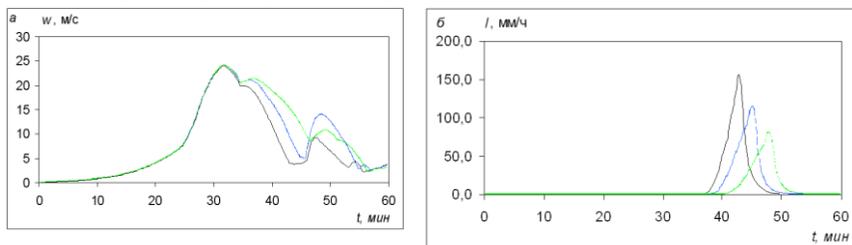


Рис. 1. Временной ход максимальных по X, Y, Z значений скорости восходящего потока (а) и интенсивности осадков у земли (б). Черная кривая – при $Q_{с.крит.} = 0,5 \text{ г/м}^3$, синяя – при $Q_{с.крит.} = 1,5 \text{ г/м}^3$, зеленая – при $Q_{с.крит.} = 2,5 \text{ г/м}^3$.

Следует отметить, что бимодальный ход максимума водности дождевых капель связан с тем, что сначала рост их массы обусловлен автоконверсией облачных капель и непрерывным ростом, а затем таянием градин, выпадающих из области отрицательных температур (второй фактор начинает проявляться в моменты времени после 30 мин).

При увеличении порога автоконверсии образование и выпадение осадков, а, следовательно, и диссипация облака происходят позднее, чем в базовом случае. Наибольшее значение вертикальной скорости во всех случаях достигается до начала осадкообразования, поэтому оно остается неизменным. Однако дальнейшее изменение максимума вертикальной скорости при различных значениях $Q_{с.крит.}$ происходит по-разному. При больших значениях $Q_{с.крит.}$ восходящий поток подавляется слабее, так как образуется меньшее количество осадков.

Еще одним фактором, связанным с взаимодействием облаков и аэрозолей, является льдообразующее действие аэрозоля. В большинстве облаков работает механизм гетерогенного льдообразования, который обычно проявляется в диапазоне температур от -10 до -15°C .

Этот процесс значительно ускоряет и усиливает осадкообразование, что используется в практике активных воздействий на облака путем введения

частиц, обладающих льдообразующими свойствами [1], которых в естественных условиях недостаточно. В описываемых условиях, когда концентрация аэрозоля на порядки превышает фоновые значения, достаточно большим оказывается и число частиц, обладающих льдообразующим свойством.

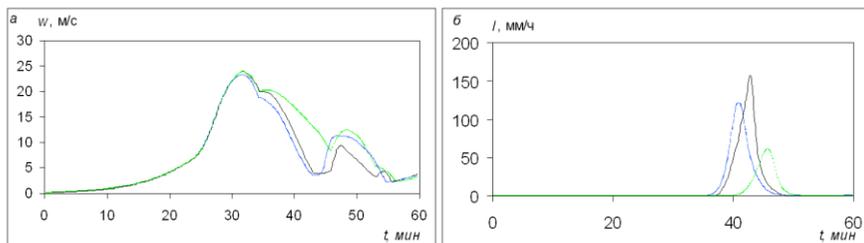


Рис.2. Временной ход максимального по X , Y , Z значения скорости восходящего потока (а) и интенсивности осадков у Земли (б). Черная кривая – без учета льдообразующей активности аэрозоля, синяя – при $k = 10\%$, зеленая – при $k = 50\%$.

В используемой модели льдообразующее действие пылевого аэрозоля задается параметрически. Предполагается, что в слое облака, охватывающем диапазон температур от -10 до -15°C , дополнительно по сравнению с базовым случаем замораживается некоторая часть переохлажденной жидкой влаги, характеризующаяся коэффициентом k .

Результаты расчетов для $k = 0,1$ и $0,5$ показаны на рис.2. Влияние льдообразующих свойств пылевого аэрозоля начинает проявляться на 26-й минуте, когда верхняя граница облака достигает высоты 5 км, и в нем начинает замораживаться переохлажденная влага. Это влияние неоднозначно зависит от k . При $k = 0,1$ наблюдается ускоренное выпадение осадков, которое подавляет развитие конвекции, что способствует быстрой диссипации облака и прекращению осадкообразования. Таким образом, максимум интенсивности осадков становится меньше, чем в базовом случае. То же происходит и с максимумами водности дождевых капель, ледности градин, и радиолокационной отражаемости. При $k = 0,5$ наблюдается иная картина. При замораживании облачных капель уменьшается их количество; таким образом, автоконверсия и переход облачных капель в дождевые затруднены. В результате дождевых капель образуется мало по сравнению с базовым случаем, и осадкообразование существенно задерживается.

Для оценки влияния повышенной концентрации аэрозоля был введен и рассчитан коэффициент экстремальности E_x , который представляет собой

отношение выбранной рассчитанной максимальной характеристики облака в случае повышенной концентрации аэрозоля к ее значению в базовом случае с фоновым аэрозолем. Моделирование позволяет вычислить этот коэффициент для разных характеристик облака, в том числе измеряемых.

Так, в случае льдообразующего действия аэрозоля на облако ($k=0,1$) значение E_x составляет: для водности облачных и дождевых капель – 0,54 и 0,84 соответственно, для ледности – 0,65, для интенсивности осадков у земли – 0,77. Это иллюстрирует ослабление процессов льдообразования и выпадения осадков и согласуется с данными натуральных наблюдений, которые показывают, что при пыльных бурях интенсивность и количество осадков заметно уменьшается. Для скорости восходящего потока данный коэффициент близок к единице, так как ее максимум достигается до начала процесса льдообразования.

В случае изменения порога автоконверсии с $0,5 \text{ г/м}^3$ (базовый случай) до $1,5 \text{ г/м}^3$ значение E_x составляет: для водности облачных и дождевых капель – 1,26 и 0,82 соответственно, для ледности – 0,85, для интенсивности осадков у земли – 0,74. Это соответствует случаю воздействий на облака повышенной концентрацией гигроскопического реагента.

Заключение

На примере развития грозоградового Сb, наблюдавшегося в Саудовской Аравии 3 июля 2009 г., выполнено исследование возможного влияния сильного загрязнения атмосферы пылевым аэрозолем естественного происхождения на характеристики Сb и связанных с ними осадков.

С использованием наземного радиолокатора и радиометрической аппаратуры, установленной на спутнике, получены характеристики Сb в условиях высокого аэрозольного загрязнения аэрозолем естественного происхождения с высотой верхней границы, превышающей 14 км, и максимальной отражаемостью в 58dBZ.

Для рассматриваемого случая с помощью численной нестационарной трехмерной модели выполнены численные эксперименты по моделированию влияния пылевого аэрозоля на эволюцию конвективных облаков. Моделировалось развитие облака при фоновом и повышенном содержании аэрозоля. При этом с фоновым случаем сравнивались ситуации, когда аэрозоль обладает: а) гигроскопическими б) льдообразующими свойствами. Получено, что оба фактора существенно влияют как на динамику облака, так и на образование и выпадение осадков. Под действием гигроскопических свойств аэрозоля характеристики облака и осадков изменяются существенно слабее,

чем под действием льдообразующих свойств. Во всех случаях содержание дождевых капель и градин, радиолокационная отражаемость и интенсивность осадков у земли уменьшаются. Это согласуется с натурными наблюдениями, которые показывают, что при пыльных бурях заметно уменьшаются осадки.

Для оценки влияния повышенной концентрации аэрозоля был введен и рассчитан коэффициент экстремальности E_x , который представляет собой отношение выбранной рассчитанной максимальной характеристики облака в случае повышенной концентрации аэрозоля к ее значению в базовом случае с фоновым аэрозолем. Так, в случае льдообразующего действия аэрозоля на облако при замораживании 10% облачных капель значение E_x для интенсивности осадков у земли составляет 0,77. В случае гигроскопического действия при изменении порога автоконверсии с $0,5 \text{ г/м}^3$ (базовый случай) до $1,5 \text{ г/м}^3$ значение E_x для интенсивности осадков составляет 0,74. Таким образом, повышенное содержание аэрозоля приводит к уменьшению осадков у земли, что действительно наблюдается при пыльных бурях.

Настоящая работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 13-05-92697 ИНД_а. Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова [3].

Список литературы

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Тапасханов В.О., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Макушев М.К., Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т., Ташилова А.А., Кешева Л.А. Физика градовых облаков и активных воздействий на них. – Нальчик: ООО «Печатный двор», 2013. – 216 с.
2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
3. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад. В. Практика суперкомпьютера «Ломоносов». – М.: Издательский дом «Открытые системы», 2012. – 7 с.
4. Волощук В.М., Седунов Ю.С. Процессы коагуляции в дисперсных системах. - Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 320 с.
5. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров А.С., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I.

Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока//Тр. ГГО. – 2008.- № 558. - С. 102–142.

6. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II: Микрофизический блок модели//Тр. ГГО. - 2010. - Вып. 562. - С. 7–39.

7. Довгалюк Ю.А., Ивлев Л. С. Физика водных и других атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во СПбГУ, 1998. - 320 с.

8. Краус Т. В., Синькевич А. А., Гхулам А.С. Измерение осадков высокой интенсивности дистанционными методами//Метеорология и гидрология. – 2012. - N7. – С.15-27.

9. Краус Т. В., Синькевич А. А., Бургер Р., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д. Исследование влияния динамических факторов на развития кучево-дождевого облака в Саудовской Аравии//Метеорология и гидрология. – 2011. - N10. – С.5–19.

10. Поташник Э.Л., Кузнецов А.Д. Математическое моделирование облачных процессов. Учебное пособие. - С-Пб.: изд-во РГГМУ, 2010. – 444с.

11. Синькевич А.А., Краус Т.В. Воздействия на облака в Саудовской Аравии, статистическая оценка результатов//Метеорология и гидрология. – 2010. - N6. – С. 26-37.

12. Berry E.X. Cloud droplet growth by collection//J. Atm. Sci. - 1967. - Vol. 24. - P. 688-701.

13. Dayan, U., Ziv, B., Shoob, T. and Enzel, Y. (2008), Suspended dust over south-eastern Mediterranean and its relation to atmospheric circulations//Int. J. Climatol. - 28: 915-924. doi: 10.1002/joc.1587.

14. Kessler E. On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations//Meteorological Monographs. - 1969. - V.10, No.32. – 84 pp.

15. Khain, A., A. Pokrovsky, M. Pinsky, A. Seifert, and V. Phillips. Simulation of effects of atmospheric aerosols on deep turbulent convective clouds using a spectral microphysics mixedphase cumulus cloud model. Part I: Model description and possible applications//J. Atmos. Sci. – 2004. – Vol. 61. – P. 2963-2982.

16. Liu Y., Daum P.H. Parameterization of the Autoconversion Process. Part I: Analytical Formulation of the Kessler-Type Parameterizations//J. Atm. Sci. - 2004. - Vol. 61. – P. 1539-1548.

17. Seifert A., Stevens B. Microphysical Scaling Relations in a Kinematic Model of Isolated Shallow Cumulus Clouds//J. Atm. Sci. – 2010. - Vol. 67. - P. 1575-1590.

18. Seifert, A., and K. Beheng. A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds, Part II: maritime versus continental deep convective storms//Meteorology and Atmospheric Physics. – 2006. - Vol. 92. – P. 67-88.

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГРАДОВОГО ОБЛАКА

Б.А. Ашабоков, А.Х. Кагермазов, А.В. Шаповалов

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Достаточное совпадение прогнозных значений стратификации атмосферы, получаемых по глобальным моделям атмосферы с фактическими данными аэрологического зондирования, означало бы решение важной проблемы отсутствия исходных данных с необходимым разрешением для расчетов математических моделей облаков.

В исследовании физики конвективных облаков и активных воздействий на них на современном этапе на передний план выходит изучение образования и развития облаков с учетом взаимодействия процессов различных видов между собой и взаимодействия облака с окружающей атмосферой. Связано это с тем, что конвективные облака представляют собой чрезвычайно сложную термогидродинамическую и микрофизическую систему, важными особенностями которой наряду с нестационарностью, трехмерностью и нелинейностью является некоторая автономность. Свойства этой автономности по большей части определяются скорее всего начальными данными, которые до настоящего времени остаются одномерными (стратификация атмосферы по вертикали). Поэтому возможность использования начальных данных в виде полей метеоэлементов в моделировании облаков предполагает значительное продвижение в разработке трехмерных численных моделей конвективных облаков с детальным учетом процессов термогидродинамики и микрофизики и проведение на их основе численных экспериментов, способствующих развитию теории облако- и осадкообразования и решению вопросов активного воздействия на облака. Этим и вызван определенный интерес и актуальность проведения исследований по валидации выходных данных полей метеопараметров глобальных моделей атмосферы.

Интенсивное развитие вычислительных средств, информационных технологий (Интернет) и, как следствие, оперативная доступность результатов расчетов глобальных моделей атмосферы открывает новые возможности для развития методов моделирования атмосферных процессов, элементов и явлений погоды на основе новой информационной базы.

Глобальная система прогноза (GFS) Национального центра экологического прогноза США (NCEP)

В настоящей работе проводится валидация выходной продукции Глобальной Системы Прогнозов (GFS NCEP) на примере расчетов параметров атмосферы, используемых в прогнозе града, а, следовательно, условий, приводящих к развитию мощного конвективного облака.

Национальным центром экологического прогноза (NCEP) США [13] разработана и реализована первая в мире доступная для всех потребителей оперативная технология выпуска гидродинамических прогнозов метеорологических полей.

Основные свои черты модель приобрела в начале 90-х годов после обобщающих работ авторов [10-12].

Глобальная модель атмосферы высокого пространственного разрешения (T254) имеет дискретность по времени 3 часа для заблаговременности 0-180 ч. и 12 часов для заблаговременности 180-384 часа. Время счета для одних суток 12 минут.

В последнем варианте глобальной модели расчеты проводятся на гауссовой сетке с разрешением (768x384), что приблизительно соответствует горизонтальному разрешению $0,5^\circ$ широтно-долготной сетки. Для большей части территории США горизонтальное разрешение доведено до 12 км (модель NAM North American Mesoscale, Северо-Американская Мезошкала). Для отдельных территорий и регионов как в США, так и в мире используется модель WRF-ARW с еще большим разрешением. WRF является сокращением от Weather Research and Forecasting (исследование и прогноз погоды). Оно является общим для двух моделей, разработанных в США: WRF-ARW и WRF-NMM. Вторые составляющие этих сокращенных названий моделей обозначают их различные динамические ядра. ARW является сокращением от Advanced Research WRF. Это динамическое ядро было разработано в NCAR (National Center for Atmospheric Research). NMM является сокращением от Nonhydrostatic Mesoscale Model. Это динамическое ядро было разработано в NCEP (National Centers for Environmental Prediction). По вертикали толща атмосферы (от поверхности земли до высоты изобарической

поверхности 0,27гПа) разделена на 64 слоя, к серединам которых предписаны основные счетные Sigma – уровни.

Координатная сетка по вертикали неоднородна: имеет место сгущение в нижних слоях, где 1,5 км пограничный слой атмосферы описывают 15 счетных уровней и 24 уровня выше 100 гПа.

Часть выходной продукции модели (аналог радиозонда), подвергнутая валидации, необходима для использования в методе прогноза мощного конвективного облака. Она включает в себя прогностические поля (с заблаговременностью 18-24 часа) следующих метеорологических элементов:

- геопотенциальных высот (H, дам) изобарических поверхностей 1000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 50 и 10 гПа.

Соответствующие этим изобарическим поверхностям значения следующих параметров:

- температуры воздуха (t, °C);
- относительной влажности воздуха (F, %);
- зональной и меридиональной составляющей скорости ветра (W, м/с);

Выходная продукция выпускается в оперативном режиме по исходному сроку 00.00 и обновляется через каждые 3 часа.

В настоящее время при исследовании и прогнозе локальных атмосферных процессов, протекающих над ограниченной территорией, широко используются мезомасштабные метеорологические модели, которые опираются на нестационарные трехмерные уравнения гидротермодинамики атмосферы и параметризацию атмосферных процессов (потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, конвективных процессов, пограничного слоя, микрофизики влаги, турбулентности атмосферы, тепло- и влагообмена в подстилающей поверхности) [9]. Компьютерная реализация таких моделей основана на применении нетривиальных вычислительных алгоритмов и высокопроизводительных вычислительных ресурсов. В крупных мировых центрах (NCAR, EPA, ECMWF, NERC) для исследования атмосферных процессов созданы и свободно распространяются исходные коды программ моделей такого уровня. Использование этих моделей в исследовательской и прикладной работе в России ограничено [2]. Это обусловлено, с одной стороны, недостаточным распространением необходимых вычислительных ресурсов, с другой стороны, отсутствием необходимого числа специалистов.

В центрах данных большая часть информации формируется в результате измерений, проведенных со спутников, самолетов, наземных платформ и компьютерных расчетов. Информационные системы, связанные с архивами,

содержат необходимый инструментарий для анализа данных, работы с временными рядами и визуализации. Как правило, это прикладные программы, которые пользователь может устанавливать на своем рабочем месте. В последние годы развиваются информационные системы с доступом по сети Интернет.

Информационно-вычислительные ресурсы о состоянии атмосферы, в основном, представлены веб-сайтами, предоставляющими пользователю прогноз различных метеорологических величин на ближайшее время в каком-либо определенном регионе.

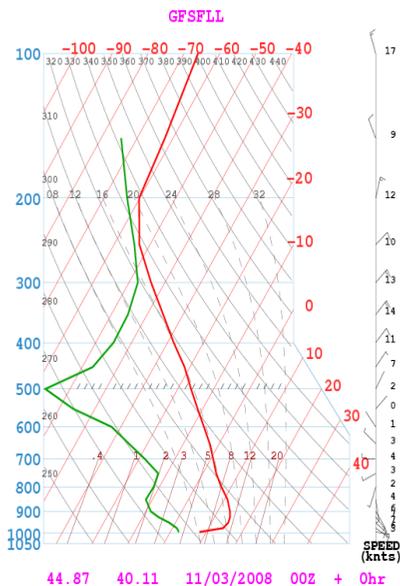
Нами был выбран сайт Лаборатории Воздушных Ресурсов (Air Resources Laboratory ARL) предоставляющий глобальную климатическую информацию – RAP Real-Time Weather [14], использующий глобальные климатические модели, такие как GFS национального центра атмосферных исследований США [13]. Самым распространённым видом представления результатов расчётов пользователю является графический – в виде статичного изображения (рис.1), но некоторые из ресурсов также позволяют получить табличное отображение результатов.

Предназначение описанных выше информационно-вычислительных ресурсов – предоставлять краткосрочный (от 6 часов до 2 суток) прогноз на какую-либо область, выбранную на общей карте мира. На рис.1 приводятся данные представленные в графическом и табличном видах. На основе этих данных были разработаны алгоритм и программа расчета основных характеристик мощных градовых облаков и предикторов, применяемых в методах их прогноза.

Алгоритм расчета параметров атмосферы и облаков, обуславливающих возникновение и развитие градовых процессов

Представленный алгоритм расчета параметров атмосферы и облаков рис.2 [8], обуславливающих возникновение, развитие и интенсивность градовых процессов, является обобщением схем расчета параметров, используемых в существующих методах прогноза конвекции и связанных с нею опасных явлений погоды. Ожидаемые преимущества такого подхода в значительной степени усиливаются, если исходными данными для обобщенного алгоритма расчета параметров мощных конвективных облаков и прогноза града берутся данные из глобальных прогностических моделей, таких как GFS, что приведены выше. Как и в случае с реальным зондом входными данными будут: температура воздуха, температура точки росы и характеристики ветра у земли и на изобарических поверхностях 850, 700, 500, 300, 220

гПа, а также в особых точках, отмеченных в тропосфере, полученных по данным расчета для различных пунктов (координат).



PRESS	HGT(MSL)	TEMP	DEW PT
WIND DIR	WIND SPD		
HPA	M	C	C
DEG	M/S		
993.	233.	8.1	2.4
95.9	1.7		
975.	385.	14.1	1.2
113.4	3.3		
950.	604.	14.7	-1.7
119.7	3.7		
925.	829.	14.3	-5.6
127.7	3.9		
900.	1060.	13.4	-8.6
136.7	3.5		
850.	1538.	10.9	-11.8
166.2	2.1		
800.	2039.	7.3	-11.6
205.5	1.4		
750.	2566.	3.7	-12.4
250.9	2.0		
700.	3123.	0.7	-18.3
272.2	2.1		
650.	3714.	-2.7	-25.2
301.8	1.6		
600.	4343.	-6.8	-32.5
313.0	0.9		
550.	5015.	-11.4	-46.1
54.8	0.5		
500.	5738.	-16.3	-56.9
38.0	1.1		
450.	6523.	-21.5	-47.1
47.1	3.7		
400.	7379.	-28.3	-45.0
51.0	5.7		
350.	8322.	-35.5	-45.3
51.5	7.5		
300.	9375.	-43.8	-7.5
54.5	6.7		
250.	10574.	-53.0	-54.3
57.3	5.2		
200.	11984.	-60.2	-63.5
19.7	6.7		

Рис.1. Пример графического и табличного представления расчетных данных о стратификации температуры, влажности, скорости ветра и его направления для произвольной широты и долготы.

Приведенный алгоритм позволяет рассчитывать большой комплекс характеристик атмосферы и облаков, состоящий из более 40 параметров. Все они находят широкое применение при прогнозе как конвективных облаков, так и явлений, связанных с ними [1,3,5,6,8,9].

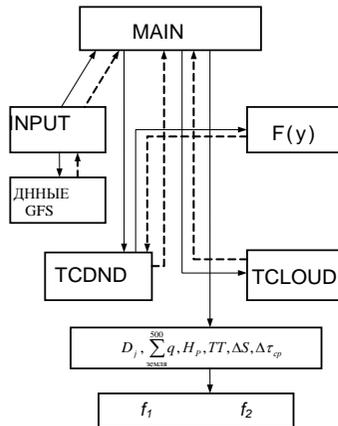


Рис.2. Структурная схема алгоритма автоматизированного альтернативного метода прогноза мощного конвективного облака и града.

В ходе дополнительных исследований по валидации вышеописанных выходных данных глобальной модели GFS по фактическим аэрологическим данным пунктов Минеральные Воды и Дивное было показано высокое совпадение их значений [4].

Необходимо подчеркнуть, что хорошие совпадения значений параметров атмосферы по модели GFS с фактическими значениями получены несмотря на заблаговременность 18-24 часов. Это означает, что при их использовании в качестве исходных данных при расчете трехмерной модели облака будет некоторый запас времени, столь необходимый для актуализации результатов расчетов для оперативного использования.

Полученные результаты, кроме того, позволяют предположить, что использование выходных данных региональных моделей, таких как NAM модель или WRF модель, упомянутых выше, может быть довольно плодотворным при моделировании подробных трехмерных моделей мощных конвективных облаков. Начальные и граничные условия, в этом случае, можно будет задавать в трехмерном виде. На рис.3–5 в качестве примера приведены выборочные поля температуры и ветра по разным изобарическим высотам

для ячейки координатной сетки размером $0,5^0$ или (55X55) км, для произвольно выбранной точки на территории США.

В **заключение** отметим, что рассматриваемая область имеет размер, практически совпадающий с характерными размерами (60x60x16 км) области расчета при трехмерном моделировании мощных конвективных облаков. При этом, в пределах этой области наблюдаются довольно существенные градиенты полей метеозлементов (1-2 $^{\circ}\text{C}$ по температуре, до 10-15 м/сек по величине скорости ветра и 180° градусов по направлению), что в начальных данных при расчетах моделей облаков в настоящее время не учитывается.

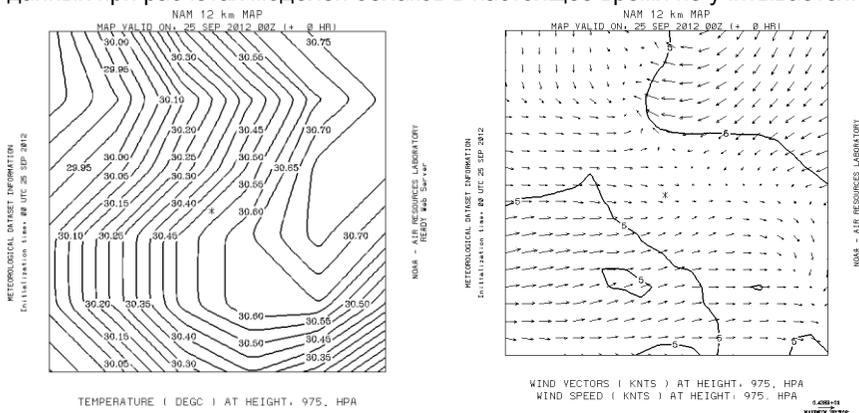


Рис.3. Поле температуры воздуха, направления и скорости ветра для изобарической поверхности 975 мб.

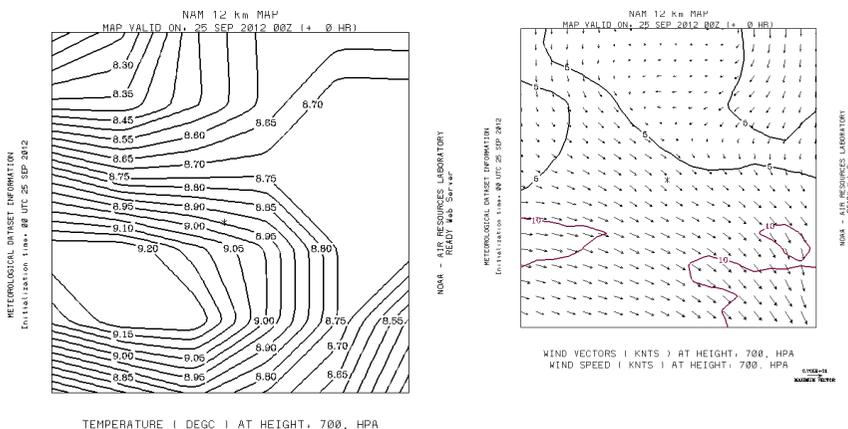


Рис.4. Поле температуры воздуха, направления и скорости ветра для изобарической поверхности 700 мб.

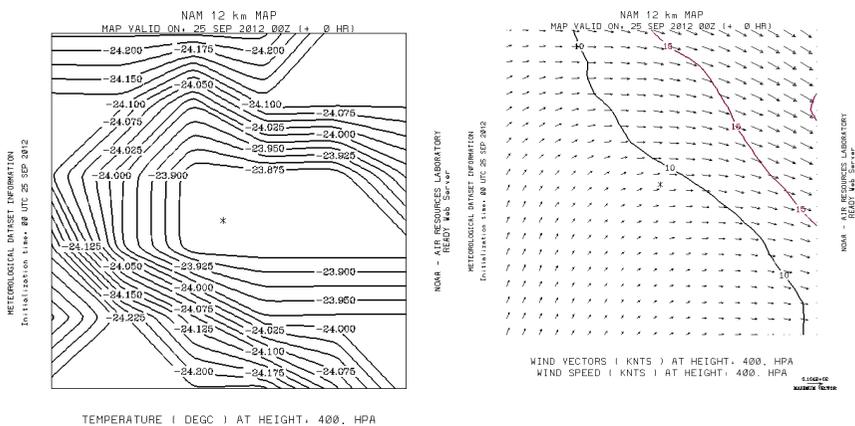


Рис.5. Поле температуры воздуха, направления и скорости ветра для изобарической поверхности 400 мб.

Кроме того, область для моделирования можно подобрать по прогнозируемому в ней развитию градового облака согласно вышеприведенному подходу. И, наконец, отметим, что в настоящее время такие данные становятся доступными для многих регионов мира.

Список литературы

1. Гораль Г.Г., Мальбахова Н.М. Оценка потенциальной неустойчивости атмосферы при развитии градовых процессов. //Метеорология и гидрология. 1985. № 3. С. 36-45.
2. Кагермазов А.Х. Прогноз града по выходным данным глобальной модели атмосферы (Т254 NCEP). //Метеорология и гидрология. 2012. № 3. С. 28-34.
3. Кагермазов А.Х., Сиротенко Л.А. Результаты апробации программных модулей расчета метеопараметров и компьютерного прогноза града по данным аэрологического зондирования на Северном Кавказе // Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Физика атмосферы. Спецвыпуск. 2010. С. 49-53.
4. Кагермазов А.Х. Валидация выходных данных Глобальной Системы Прогнозов GFS (Global Forecasts System) с результатами аэрологического зондирования//Известия КБНЦ РАН. 2014. № 3 (59).

5. Решетов Г.Д. Метод прогноза града для обеспечения безопасности полетов // Тр. Гидрометцентра СССР. 1978. Вып. 201. С. 3-28.
6. Федченко Л.М., Кагермазов А.Х. О выборе предикторов для прогноза опасных конвективных явлений погоды по максимуму коэффициента бисериальной корреляции // Тр. ВГИ. 1986. Вып. 65. С. 80-87.
7. Федченко Л.М., Кагермазов А.Х. Оценка возможности разделения типов погоды (град не град) с помощью дискриминантных функций // Тр. ВГИ. 1987. Вып. 67. С. 51-57.
8. Федченко Л.М., Кагермазов А.Х. Использование статистических методов для прогноза градовых процессов и их характеристик // Метеорология и гидрология. 1988. № 4. С. 41-50.
9. Grell G.A. et al. A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Tech. Note, NCAR/TN-398+IA. 1993. 122p.
10. Kalnay E., Kanamitsu M., and Baker W.E., Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1990. Vol. 71. P. 1410–1428.
11. Kanamitsu, M., Description of the NMC global data assimilation and forecast system // Wea. and Forecasting. 1989. Vol. 4. P. 335–342.
12. Kanamitsu, M., Alpert J.C., Campana K.A., Caplan P.M., Deaven D.G., Iredell M., Katz B., Pan H.-L., Sela J., and White G.H., Recent changes implemented into the global forecast system at NMC // Wea. and Forecasting. 1991. Vol. 6. P. 425–435.
13. NCEP/EMC <http://www.nco.ncep.noaa.gov/>
14. NOAA- Air Resources Laboratory www.arl.noaa.gov.

**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ФГБУ «ВЫСОКОГОРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Б.А. Ашабоков, В.О. Тапасханов, Л.М. Федченко,
А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов**

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Физика облаков и активные воздействия на них позволяет решать важные для современного общества задачи, в частности, управлять перерас-

пределением осадков, разрушением конвективных ячеек, созданием полос просветления в слоистообразных облаках, борьбой с грозами, градом, смерчами, метеозащитой городов при проведении массовых мероприятий и др. Поэтому знание физических закономерностей образования и развития облаков различных типов, формирования в них жидких и твердых осадков, электрического заряда, является чрезвычайно важным и требует комплексных исследований. Современное состояние физики облаков характеризуется тем, что накоплен значительный экспериментальный материал по исследованию процессов в облаках, разработан математический аппарат, позволяющий описывать термодинамические и микрофизические процессы.

Наряду с успехами, достигнутыми в физике облаков за последние десятилетия, следует отметить, что некоторые вопросы еще остаются малоизученными. Это относится, прежде всего, к процессам в облаках с участием ледяных частиц, электричеству облаков, взаимодействию процессов в облаках и т.д. Имеется ряд проблем, которые касаются методики проведения активных воздействий на облака различных типов, оценки их результатов, выбора ситуаций, благоприятных для воздействия.

Одной из наиболее сложных в физике облаков является градовая проблема. 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.

Анализ состояния исследований градовых процессов показывает, что в настоящее время дальнейший прогресс в этой области связан с необходимостью широкого применения математического моделирования. Именно математическое моделирование, вычислительный эксперимент позволяют детально изучать формирование микроструктуры градовых облаков, разрабатывать научно-обоснованные методы воздействия на них.

Численное моделирование эволюции конвективных облаков при естественном развитии и активном воздействии позволяет решать на научной основе вопросы искусственного регулирования процессов осадкообразования. Математическое моделирование также позволяет исследовать важные аспекты электрических процессов в конвективных облаках, которые в силу опасности, недоступности и других причин не удалось изучить. С помощью

математического моделирования в настоящее время в ВГИ ведутся исследования взаимодействия различных физических процессов в облаках.

К числу наиболее сложных и значимых проблем физики облаков и активных воздействий относится разработка научно обоснованных методов управления процессами облако - и осадкообразования. В решении этой проблемы первостепенную роль играет математическое моделирование облаков, которое позволяет количественно оценить эффект АВ.

Несмотря на успехи, достигнутые в направлении математического моделирования физических процессов в облаках, 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, сложность реализации моделей на ЭВМ.

Цель современных исследований физики конвективных облаков в ВГИ заключается в теоретическом изучении формирования гидротермодинамики и микроструктуры таких облаков с учетом взаимодействия термодинамических, микрофизических и электрических процессов и усовершенствовании методов активных воздействий на них на основе моделирования развития облаков в естественном процессе и при воздействии на облака кристаллизующими реагентами.

В качестве инструмента исследований выступают разработанные в институте математические модели облаков различных типов и отдельных физических процессов, которые позволяют исследовать многие вопросы физики облаков, а именно: расчет конденсации, сублимации, коагуляции, аккреции, развитие конвективных (в том числе грозоградовых) облаков, искусственное увеличение осадков, рассеяние облаков, электрические процессы в облачной атмосфере, задачи оптимального управления микроструктурой облаков. В ВГИ разработаны модели (от одномерных до трехмерных), которые позволяют исследовать широкий спектр вопросов по физике облаков и АВ на них [1-6]. Разработано программное обеспечение трехмерного отображения данных численного моделирования и других трехмерных параметров, которое способствует более совершенной физической интерпретации результатов расчетов и наблюдений.

Важно отметить, что математическое моделирование в изучении сложных процессов:

-представляет собой концептуальный инструмент, ориентированный на анализ и прогноз изучаемых процессов;

-способствует формированию нелинейной логики мышления, синергетического подхода к пониманию механизмов развития сложных систем;

-является методологической основой системного анализа сложных процессов [1].

В ВГИ разработана достаточно полная трехмерная модель конвективного облака с детальным учетом основных процессов в облаках. Основные результаты, полученные в численном моделировании конвективных облаков, изложены в работах [1-5]. Тем не менее, до настоящего времени разработка моделей, которые адекватно описывали бы образование и развитие градовых облаков в естественных условиях и при активном воздействии, встречает трудности, связанные с недостаточной ясностью многих процессов в облаках и трудностью проведения вычислительных работ.

Остановимся на некоторых вопросах развития математического моделирования облаков различных типов. Как уже было отмечено, облака представляют собой полифазную термогидродинамическую и микрофизическую систему с большим количеством обратных связей, степеней свободы и масштабов явлений. И поэтому математическое описание процессов в облаках, и исследование образования и развития облаков являются чрезвычайно сложными проблемами математической физики и вычислительной математики.

Для исследования эволюции микроструктуры мощного градового процесса в фазе квазистационарного состояния в ВГИ была разработана двумерная модель микрофизических процессов с фиксированной гидротермодинамикой [2]. Динамика построена с использованием модели структуры воздушных потоков в суперячейковых градовых облаках Браунинга и Фута. Конвективная ячейка, диаметр которой более 15 км, объединяет восходящий и нисходящий потоки, расположенные по соседству друг с другом. Проводилось моделирование формирования микроструктуры облака в естественных условиях и при различных вариантах активного воздействия на него кристаллизующим реагентом. Модель описывает процессы коагуляции капель с каплями, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, а также их перенос воздушными потоками.

На основе двумерной модели определено, что в результате деформации полей термодинамических параметров под влиянием воздушных потоков в облаках формируется зона, в которой условия благоприятны для роста градовых частиц. Располагается эта зона между изотермами $-10 \div -25$ °С вблизи максимума восходящего потока. Также исследовано изменение градоопасности облака от места внесения искусственных кристаллов, их кон-

центрации, геометрии источников, стадии развития облака в момент активного воздействия. Теоретически подтверждено, что внесением в облако мелких ледяных кристаллов можно регулировать число образующихся в нем крупных градин. В зависимости от параметров управляющих воздействий можно не только подавлять град, но и стимулировать его. Определена область, воздействие в которую приводит к максимальному эффекту по предотвращению образования крупных градин.

Трехмерная нестационарная модель градовых облаков с детальным учетом процессов гидротермодинамики и микрофизики, разработанная в ВГИ, приведена в работах [3,4,6]. 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. В дальнейшем данная модель была усовершенствована путем добавления в нее процессов, описывающих электризацию частиц различных видов в облаках [5,6]. Эти модели использовались для моделирования образования и развития градовых процессов, а также активного воздействия на них путем внесения искусственных льдообразующих частиц [4].

Системы уравнений, на которых основаны численные модели мезомасштабной облачности, обычно решаются методом расщепления по физическим процессам и покомпонентного расщепления. На первых этапах расщепления решают уравнения гидротермодинамики. Один из распространенных подходов к численному решению уравнений динамики основан на решении эллиптического уравнения для давления. Сначала решают систему уравнений ветрового и турбулентного переноса полей воздушных потоков. Полученные поля не адаптированы. Для получения окончательных значений решают уравнение Пуассона для поля давления. Для этого используют итерационную процедуру.

Свойства ледяных частиц особенно сложны, т.к. частицы с одинаковыми массами могут иметь разные размеры и форму. Пока еще даже 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. Модель не может описать изменение формы кристалла из-за процессов осаждения пара, заиндевления, агрегации при различных условиях в облаке.

При моделировании электрических процессов в облаках считается, что процессы микроэлектризации протекают при замерзании крупных переохлажденных капель и при взаимодействии градовых и облачных частиц. В на-

чальный момент времени заряды в облаке отсутствуют, электрическое поле постоянно и равно полю хорошей погоды.

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

На крупных кристаллах, крупе и градинах накапливается электрический заряд за счет захвата переохлажденных капель. Заряд пропорционален массе замерзшей на них воды. При этом коэффициент пропорциональности зависит от температуры растущей частицы, а также от концентрации и химического состава примесей в облачной воде и принимает значение от 10^{-10} до 10^{-8} Кл/г.

Основная задача градовой проблемы - это разработка метода управления формированием микроструктуры градовых облаков. Проведение исследований по решению этой задачи на основе существующих моделей связано с "проигрыванием" различных вариантов активного воздействия на градовые облака. С учетом сложности градовых процессов такой подход предполагает перебор чрезвычайно большого количества вариантов для получения достаточно эффективного метода воздействия, что требует больших усилий.

Более целесообразным является решение соответствующей задачи управления [3], к которой естественным образом приводит данная проблема. Решение этой задачи даст возможность ответить на вопросы: когда, в какую часть облака и сколько реагента необходимо вносить для достижения цели - предотвращения образования градин опасных размеров.

Для разработки научно-обоснованных методов активных воздействий на конвективные облака в ВГИ применен математический аппарат теории оптимальных процессов. Разработана модель управления формированием микроструктуры градовых облаков, которая сводится к задаче оптимального управления с распределенными параметрами. Разработан математический аппарат численного её решения на основе метода последовательных приближений. В результате применения новых методов исследований в числен-

ном моделировании облаков рассчитаны параметры оптимального управления микроструктурой градового облака.

В ВГИ также применены в качестве начальных условий для трехмерных моделей конвективных облаков прогностические данные параметров атмосферы, полученные на основе глобальной климатической модели. При этом начальное распределение параметров тропосферы в области моделирования оказывается гораздо более реалистичным по сравнению с горизонтально однородным, которое строится по одному радиозонду аэрологического зондирования.

Заключение

Основными результатами математического моделирования облачных процессов в ВГИ является следующее:

- разработаны численные модели различной сложности и размерности, которые позволяют исследовать широкий спектр вопросов по физике облаков и АВ на них.

- на основе математического моделирования впервые исследованы новые важные аспекты механизма образования, движения и роста градин в облаках, которые обусловлены взаимодействием динамических, термодинамических, микрофизических и электрических процессов в них.

- впервые подробно исследована реакция градового облака на внесение искусственных ледяных кристаллов в различные его области. В результате уточнения теории роста крупных градин, а также численных экспериментов по моделированию активных воздействий на градовые облака предложены усовершенствованные схемы внесения кристаллизующего реагента, эффективность которых подтверждается расчетами, и она выше, чем у известных в настоящее время.

- впервые реализован вариант трехмерной модели, в которой коэффициент коагуляции частиц является не постоянной величиной, а зависящей от напряженности электростатического поля облака, рассчитываемой в каждый момент времени. С помощью модели проведена количественная оценка влияния электрических процессов на формирование осадков, показано существование положительной обратной связи между ростом частиц в облаке и увеличением напряженности электростатического поля.

Перспективы математического моделирования облачных процессов в ВГИ заключаются в исследовании облаков в целом с учетом их эмерджентных свойств и разработке эффективных методов управления процессами формирования их микроструктурных характеристик, и основным методом исследования будет математическое моделирование. Это связано с тем, что

градовые облака представляют чрезвычайно сложную термогидродинамическую и микрофизическую систему, важными особенностями которой являются нестационарность, трехмерность и нелинейность. Поэтому можно сказать, что дальнейшее развитие физики облаков и активных воздействий на них в значительной степени будет определяться состоянием математического моделирования в этой области. В связи с этим актуальность развития математического моделирования в физике облаков и активных воздействиях на них будет повышаться.

Будет продолжено развитие созданных численных моделей облаков в направлении повышения степени их адекватности и наращивания детальности описания микрофизических процессов с участием ледяной фазы (ледяных частиц).

Будут продолжены исследования по изучению взаимодействия различных физических процессов в облаках и его роли в развитии микроструктурных характеристик.

Разработка научно-обоснованных методов АВ требует развития моделей управления микроструктурой облаков. В этих моделях параметры воздействия (место воздействия, время воздействия, мощность источника) будут определяться в результате решения задачи оптимального управления для системы уравнений, описывающей трансформацию параметров облака во времени и в пространстве.

Получит развитие задание трехмерного начального состояния параметров тропосферы в области моделирования и параметров начального импульса.

Планируется развитие трехмерной модели конвекции с целью перехода к моделированию системы облаков в домене.

Будут совершенствоваться программные средства трехмерного анализа результатов моделирования и разработана база данных численных экспериментов.

Список литературы

1. Ашабоков Б.А., Калажоков Х.Х. Численное моделирование градовых облаков. - М.: Гидрометеиздат, 1992. – 135 с.
2. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шоранов Р.А. Численные исследования образования и роста града при естественном развитии облака и активном воздействии//Метеорология и гидрология. 1994. № 1. С. 41–48.

3. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. – Нальчик: Изд-во ИИГРУ РАН, 2008. 257 с.

4. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Тапасханов В.О., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Макушав М.К., Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т., Ташилова А.А., Кешева Л.А. Физика градовых облаков и активных воздействий на них: состояние и направления развития.- Нальчик: ООО "Печатный двор", 2013. 216 с.

5. 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 // Известия вузов. Радиофизика. 2013. № 12.

6. Куповых Г.В., Ашабоков Б.А. и др. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2012. № 6. С.65-68.

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ: НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ГРОЗОГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ

Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Математическое моделирование облаков с учетом электрических процессов развивается как в нашей стране [1-3], так и за рубежом [4-6]. Разработаны модели различной размерности и различной степени детальности учета микрофизических и электрических процессов. Модели с детальным описанием микрофизических процессов позволяют исследовать формирование микроструктурных характеристик облаков, образование осадков, электризацию частиц и другие процессы. Для описания микрофизических процессов в них используются кинетические уравнения для распределения частиц по размерам или массам [3]. Охватывается широкий спектр размеров частиц – от микронных размеров, до миллиметровых капель и сантиметровых градин.

В работе представлена разработанная авторами трехмерная численная модель конвективного облака с детальным описанием гидротермодинамических, микрофизических и электрических процессов, приведены результаты расчетов параметров грозоградовых облаков.

Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений движения, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска, в которых учитывается адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)u &= -\frac{\partial \pi'}{\partial x} + \Delta'u + lv, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)v &= -\frac{\partial \pi'}{\partial y} + \Delta'v - lu, \\ \frac{\partial w}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)w &= -\frac{\partial \pi'}{\partial z} + \Delta'w + g(\theta'/\theta_0 + 0,61s' - Q_s), \end{aligned} \quad (1)$$

уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma w, \quad (2)$$

уравнений термодинамики

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\theta &= \frac{L_k}{C_p T} \frac{\delta M_k}{\delta t} + \frac{L_c}{C_p T} \frac{\delta M_c}{\delta t} + \frac{L_3}{C_p T} \frac{\delta M_3}{\delta t} + \Delta'\theta \\ \frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)s &= -\frac{\delta M_k}{\delta t} - \frac{\delta M_c}{\delta t} + \Delta's, \end{aligned} \quad (3)$$

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

вектор скорости; $u(\vec{r})$, $v(\vec{r})$, $w(\vec{r})$ - компоненты вектора скорости воздушных потоков в облаке; $\Theta(\vec{r})$ - потенциальная температура; $\pi(\vec{r}) = c_p \bar{\theta} (p(\vec{r})/1000)^{R/c_p}$ - безразмерное давление; $\bar{\theta}$ - средняя потенциальная температура; R - газовая постоянная; $s(\vec{r})$ - удельная влажность воздуха; $Q_s(\vec{r})$ - суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке; $\sigma(z)$ - параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой; $P(\vec{r})$ и $T(\vec{r})$ - соответственно давление и температура; C_p - теплоемкость воздуха при постоянном давлении; L_k , L_c , L_3 - соответственно удельная теплота

конденсации, сублимации и замерзания; $\pi'(\vec{r})$, $\Theta'(\vec{r})$, $s'(\vec{r})$ - отклонения безразмерного давления, потенциальной температуры и удельной влажности от их фоновых значений в окружающей атмосфере $\pi_{\Phi}(\vec{r})$, $\Theta_{\Phi}(\vec{r})$ и $s_{\Phi}(\vec{r})$; $\frac{\delta M_K}{\delta t}$, $\frac{\delta M_C}{\delta t}$ - изменения удельной влажности за счет диффузии пара на капли и кристаллы; $\frac{\delta M_z}{\delta t}$ - масса капельной воды, замерзающей в

единицу времени в единице объема воздуха; $K(\vec{r})$ - коэффициент турбулентной диффузии; l - параметр Кориолиса. Вектор \vec{r} соответствует координатам (x,y,z). Для границ пространственной области используются обозначения 0, L_x , 0, L_y и 0, L_z .

Начальные и граничные условия для уравнений (1)-(3) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} u(\vec{r}, 0) &= u^0(\vec{r}, 0), \quad v(\vec{r}, 0) = v^0(\vec{r}, 0), \quad w(\vec{r}, 0) = w^0(\vec{r}, 0), \\ \Theta(\vec{r}, 0) &= \Theta^0(\vec{r}, 0), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u &= u_0(z), \quad \Theta = \Theta_0(z), \quad p = p_0(z), \quad q = q_0(z) \quad \text{при } x=0, L_x, \\ v &= v_0(z), \quad \Theta = \Theta_0(z), \quad p = p_0(z), \quad q = q_0(z) \quad \text{при } y=0, L_y, \\ u &= v = w = 0, \quad \Theta = \Theta_0(0), \quad p = p_0(0), \quad q = q_0(0) \quad \text{при } z=0, \\ u &= u(L_z), \quad v = v(L_z), \quad w = 0, \quad \Theta = \Theta_0(L_z), \quad p = p_0(L_z), \quad q = q_0(L_z) \quad \text{при } z=L_z. \end{aligned} \quad (5)$$

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 модели принят следующий физический процесс разделения зарядов на стадии формирования осадков – зарядение переохлажденных капель при их замерзании (знак заряда «минус»), образующиеся при этом осколки замерзания (микровыбросы) заряжены положительно.

Система уравнений для функций распределения по массам капель $f_1(\vec{r}, m, t)$, ледяных частиц $f_2(\vec{r}, m, t)$ и осколков замерзания капель $f_3(\vec{r}, m, t)$ имеет следующий вид:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + v \frac{\partial f_1}{\partial y} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КД}} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КГ}} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{АК}} +$$

$$+\left(\frac{\partial f_1}{\partial a}\right)_{DP} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial a}\right)_3 + \Delta f_1 + I_1, \quad (6)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial a} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + v \frac{\partial f_2}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_2}{\partial a}\right)_C + \left(\frac{\partial f_2}{\partial a}\right)_{AK} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial a}\right)_3 + \Delta f_2 + I_2 + I_{AB},$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial a} + u \frac{\partial f_3}{\partial x} + v \frac{\partial f_3}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_3}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_3}{\partial a}\right)_3 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial a}\right)_{AK} + \Delta f_3,$$

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

где $V_1(m)$, $V_2(m)$ - установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц; $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{KD}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{KT}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{AK}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{DP}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_3$ - изменения функции

распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно; $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_C$, $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{AK}$, $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_3$ - изменения функции распределения

кристаллов за счет сублимации, аккреции и замерзания капель; $\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_3$,

$\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{AK}$ - изменения функции распределения $f_3(\vec{r}, m, t)$ за счет образования

осколков при спонтанном замерзании переохлажденных облачных капель и их аккреции с кристаллами; I_1 и I_2 - источники капель и кристаллов; I_{AB} - источник искусственных кристаллов при активном воздействии льдообразующими реагентами.

Для системы уравнений (6) использовались следующие начальные и граничные условия:

$$f_1(\vec{r}, m, 0) = f_2(\vec{r}, m, 0) = f_3(\vec{r}, m, 0) = 0, \quad (7)$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } x = 0, L_x,$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } y = 0, L_y,$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } z = L_z \quad (8)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial z} = \frac{\partial f_2}{\partial z} = \frac{\partial f_3}{\partial z} = 0 \text{ при } z=0.$$

Для расчета электрического заряда и поля облака аппроксимированы экспериментальные зависимости выбросов микрочастиц от размера замерзающей капли и значений коэффициентов разделения зарядов, связанных с замерзанием капель воды и взаимодействием кристаллов с

переохлажденными каплями, полученные в Высокогорном геофизическом институте.

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

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

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho_e}{\epsilon_0} \quad (9)$$

при следующих граничных условиях

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \right|_{x=0, L_x}, \quad \left. \frac{\partial U}{\partial y} = 0 \right|_{y=0, L_y}, \quad \left. \frac{\partial U}{\partial z} = 0 \right|_{z=L_z}, \quad U = 0 \Big|_{z=0} \quad (10)$$

где ϵ_0 - диэлектрическая постоянная вакуума.

Напряженность электрического поля $E(x,y,z)$ в точке (x,y,z) , обусловленного зарядами ρ_e , расположенными в пространстве облака, определяется как градиент потенциала. Значения напряженности электрического поля учитывались при расчете коэффициентов электрической коагуляции облачных частиц. Для этой цели использовались аппроксимационные формулы, построенные по существующим теоретическим и экспериментальным данным для этого параметра.

Система уравнений модели решалась методом расщепления по физическим процессам и покомпонентного расщепления. [3].

Для сопоставления с данными наблюдений в модели рассчитывается радиолокационная отражаемость облака на длинах волн 3.2 и 10 см с использованием дискретного распределения частиц по размерам (массам).

На рис.1-3 приведены результаты исследований формирования термогидродинамических, микроструктурных и электрических параметров конвективного облака, полученных в ходе расчетов при неустойчивом состоянии атмосферы.

Размеры пространственной области при расчетах задавались от 60 км по горизонтали и 16 км - по вертикали. Шаг сетки по координатам X, Y составлял 500 м, по Z - 250 м. Ось X направлена на восток, Y – на север. Облако инициировалось заданием импульса у поверхности земли с перегревом $\Delta T = 1-2$ °C. Форма и размеры импульса варьировались.

На рис.1 приведены изолинии скорости воздушных потоков в вертикальной плоскости, проходящей через облако. Отмечается наличие вихря с наветренной стороны облака (слева на рисунке) и с подветренной стороны.

Во всех вариантах моделирования конвективных облаков отмечались нисходящие потоки вокруг облака. С наветренной стороны они усиливаются внешним ветром, за облаком могут быть слабее, т.к. в этой области возникает гидродинамическая тень.

С помощью разработанных средств визуализации были определены потоки, питающие облако в зрелой стадии развития (рис.2). Наблюдается вток с подветренной стороны (уровень 4 км) справа от направления ведущего потока (уровень 0-0.5 км) и с наветренной стороны справа от облака под углом примерно 45° (уровень 3 км).

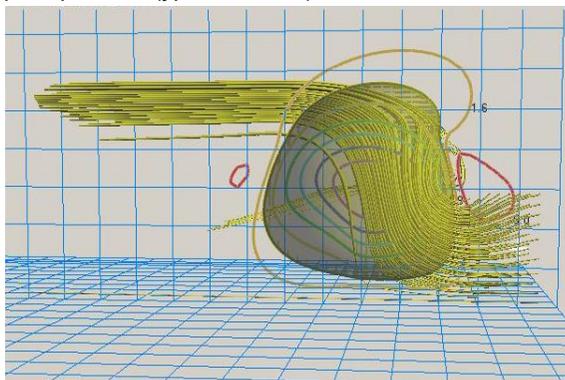


Рис.1. Изолинии скорости восходящих и нисходящих потоков воздуха в вертикальной плоскости, проходящей через облако. Пучок линий – линии тока. В горизонтальной и вертикальной плоскостях приведены вспомогательные сетки с ячейками 2x2 км.

Область сосредоточения крупнокапельной фракции (1) и область формирования ледяных частиц (2) на 40 минуте развития облака приведены на рис.3. Приведены также изолинии вертикальных потоков. Высота облака – 13 км, максимальная отражаемость - 63 dBZ.

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. На рис.4 приведены

результаты моделирования напряженности электростатического поля облака E_z (В/см) на 40-й минуте развития.

При значительной концентрации жидкой воды и при наличии в облаке некоторого количества крупных капель или кристаллов, рост осадков происходит достаточно быстро.

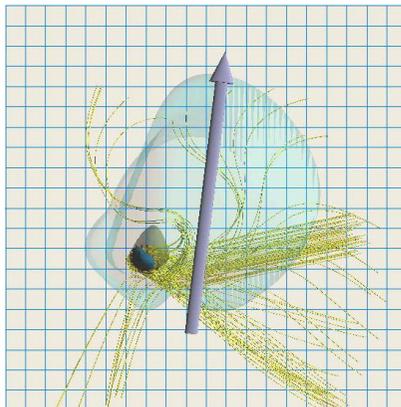


Рис.2. Вид сверху на модельное облако, пучки линий – линии тока. Полупрозрачной изображена радиолокационная отражаемость 10 dBZ. Стрелка указывает направление ведущего потока.

До этого, основная 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 различным данным он составляет от 0,001 до 0,01. При наличии электрического поля и зарядов на частицах этот коэффициент значительно возрастает и при определенных условиях ($E > 1000$ В/см) может превышать 1.

Заключение

Разработана трехмерная нестационарная численная модель конвективного облака с детальным описанием термогидродинамических, микрофизических и электрических процессов. Формализован процесс накопления электрического заряда при замерзании капель и аккреции их с ледяными частицами. Разработаны алгоритмы расчета потенциала, напряженности электростатического поля, электрической коагуляции.

На основе разработанной модели проведены численные эксперименты по исследованию формирования конвективных облаков при различных стратификациях атмосферы и фоновом ветре.

Список литературы

1. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. - Нальчик, 2008. 254 с.
2. Ашабоков Б.А., Бейтуганов М.Н., Куповых Г.В., Шаповалов А.В., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков//Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2012. № 6. С. 65-68.
3. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. Численное моделирование облаков. - М., 1984. 186 с.
4. Clark T. Numerical Simulation with a Tree-Dimension Cloud Model: lateral Boundary Condition Experiments and Multiceller Severe Storm Simulations//J. Atm. Sci. 1979. V.36. N. 11. P. 2191-2215.
5. Rawlins F. A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase//Quart. Jour. of the Royal Met. Society. 1982. V.108. P. 779-801.
6. Straka J.M. Cloud and precipitation microphysics. Principles and Parameterizations. - Cambridge University Press, 2009. 392 P.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИЕМА И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НОВОГО РОССИЙСКОГО ДМРЛ-С

**А.В. Шаповалов¹, В.А. Шаповалов¹, В.О. Тапасханов¹,
В.Н. Стасенко²**

*1 - ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик
2 - ФГБУ «НИЦ «Планета», г. Москва*

Программное обеспечение вторичной обработки информации (ПО ВОИ) «ГИМЕТ-2010» предназначено для установки на рабочие станции метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-СМ для приема, анализа, архивирования и отображения радиолокационной метеорологической информации.

ПО применяется для обеспечения авиационных метеорологических центров, аэропортов и автоматизированных систем управления воздушным движением информацией об облачности и связанных с ней опасных явлениях погоды (сильные ливни, грозы, град, шквал) с высокой надежностью и

оперативностью в удобном для потребителя виде. ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» позволяет получать карты метеорологических радиолокационных продуктов, имеющие высокую статистическую оправдываемость, и обеспечивать решение ряда прикладных задач:

- оповещение об опасных явлениях погоды;
- радиолокационное измерение осадков;
- ведение информационного банка данных об облаках и осадках;
- передача данных на абонентские пункты и потребителям;
- автоматизация операций по модификации погоды, выполняемых в условиях реального времени;
- обеспечение научных исследований облачных процессов и т.д.

ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» выдает метеорологическую радиолокационную информацию о пространственном распределении облачных образований, зон осадков и грозоградовых очагов, карты доплеровских параметров (скорости, ширины спектра и др.) об их перемещении и эволюции (рис.1-2).

Комплекс «ГИМЕТ-2010» состоит из 6 программ (прием, анализ, отображение, передача информации и др.). Основная программа UVK1 обеспечивает анализ информации, построение карт с высоким пространственным разрешением, а также ввод и сохранение различных служебных и пользовательских настроек. На рис.1 приведена карта интерпретации данных ДМРЛ-С в виде метеорологических явлений согласно утвержденным Росгидрометом критериям. Радиус радиолокационного обзора составляет 250 км в режиме отражаемости и 125 км в режиме доплеровской скорости. Обеспечивается дискретность информации 250 м по лучу (125 м в режиме скорость). По азимуту дискретность составляет 1 град.

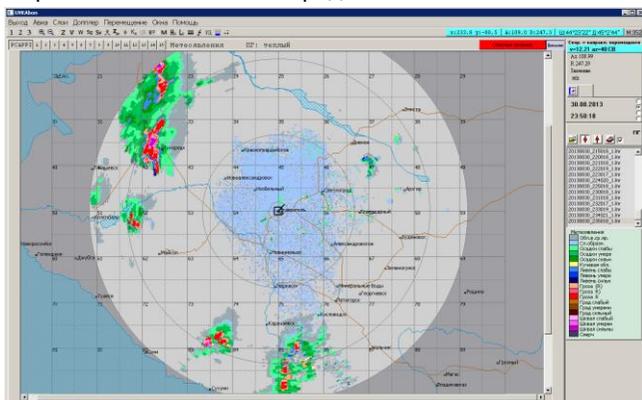


Рис.1. Карта метеорологических явлений в поле обзора ДМРЛ-С.

Каждые 10 мин. ДМРЛ-С делает два типа сканирования атмосферы: первый предназначен в большей степени для измерения радиолокационной отражаемости облаков, второй – скорости. Количество оборотов антенны в этих двух типах измерений различно (24 оборота и 8 оборотов, соответственно).

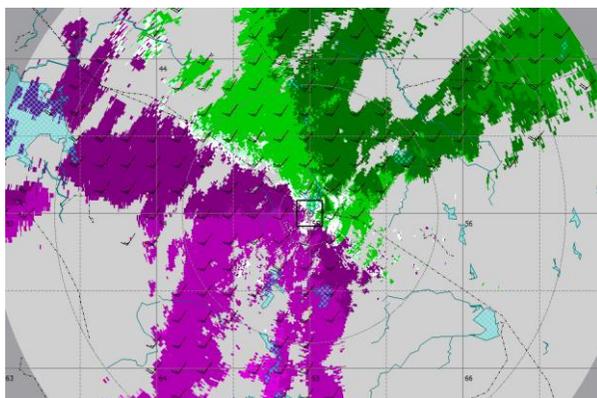


Рис.2. Карта доплеровской скорости.

Программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме без участия персонала по заданной программе:

- получать радиолокационную информацию в полусфере обзора за определенное время (10 минут);
- удалять мешающие отражения от местных предметов (при помощи вычитания карты местных предметов);
- отображать общую информацию о наличии, интенсивности, направлении, скорости смещения и тенденции развития облачности на расстоянии до 250 км;
- отображать информацию об облачности с высокой разрешающей способностью, включая высоты верхней и нижней границ, отображение отражаемости с градацией через 5 дБ, направление и скорость перемещения, трехмерную графику;
- производить расчет полей метеорологических характеристик и карт явлений погоды (град, гроза, ливневый дождь, снегопад, шквал), интенсивности и количества осадков;
- производить распечатку любой имеющейся информации по выбору оператора;

- производить архивацию и отображение всей накопленной информации;

- производить сверхкраткосрочный прогноз эволюции метеоявлений.

Программа UVK1 рассчитана на работу в операционной системе LINUX (Ubuntu 12.04 64-bit). На абонентских пунктах используется ОС Windows (XP, 7, 8).

С помощью меню «Карты» можно получить информацию о метеорологических явлениях:

- «Все метеоявления»: позволяет вывести двумерную карту всех явлений в области;

- «Опасные метеоявления»: позволяет вывести двумерную карту опасных метеоявлений в области отображении;

- «Видимость»: позволяет вывести двумерную карту видимости;

- «Верхняя граница»: позволяет вывести двумерную карту верхней границы облаков;

- «Нижняя граница»: позволяет вывести двумерную карту нижней границы облаков;

- «Интенсивность осадков»: позволяет вывести двумерную карту интенсивности осадков, которая рассчитывается из соотношения $Z=al^b$, где Z – отражаемость на уровне 0,5-1 км; I – интенсивность осадков мм/ч; a и b – коэффициенты;

- «Верт. инт. вод. VII.Л»: позволяет вывести двумерную карту водности.

В окне вертикального сечения облачности (рис.3) слева представлена шкала высот в километрах, на горизонтальной оси приведена длина сечения.

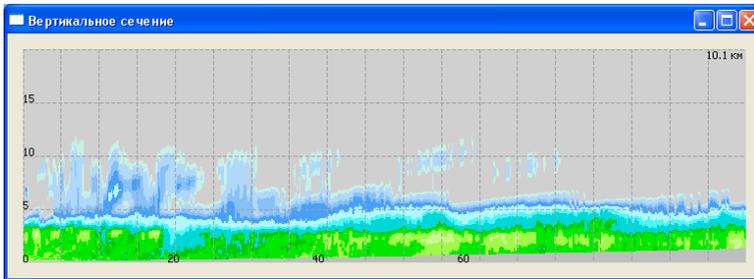


Рис.3. Вертикальный разрез по выбранному направлению.

С помощью меню «Уровни» производится выбор типа информации горизонтальных сечений на уровнях:

- «Z1» - карта отражаемости в слое 1км;

- «Z2» - отображение горизонтального сечения отражаемости на уровне нулевой изотермы;
- «Z3» - отображение горизонтального сечения отражаемости на уровне $0^{\circ}\text{C} + 2,5 \text{ км}$;
- «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. При помощи данного меню можно построить карты:

- отражаемости (рис.4);
- радиальных скоростей;
- ширины спектра;
- сдвигов ветра (горизонтального и вертикального);
- вертикально-интегрированной водности;
- дифференциальной отражаемости (рис.5);
- дифференциальной фазы;
- модуля коэффициента кросскорреляции;
- линейного деполяризационного отношения (при излучении только горизонтальной поляризации).

Кроме того, выводятся следующие данные:

- «VAD» - отображает дисплей азимутальной скорости (рис.6);
- «WIPR» - отображает вертикальный профиль ветра (рис.7);
- «VWP» - отображает профиль ветра со временем по режимам «скорость» (рис.8);
- «HWIND» - отображает горизонтальный ветер;
- вертикальное сечение первичных данных;
- карта турбулентности;
- карты pseudo-cappi и др.

Программа UVK1 выдает световую и звуковую индикацию при наличии в обзоре опасных явлений. Порог срабатывания индикации - настраиваемый.

Данные ДМРЛ-С могут конвертироваться в международный формат HDF5, для объединения информации в региональном и государственном масштабе используется формат BUFR FM 94.

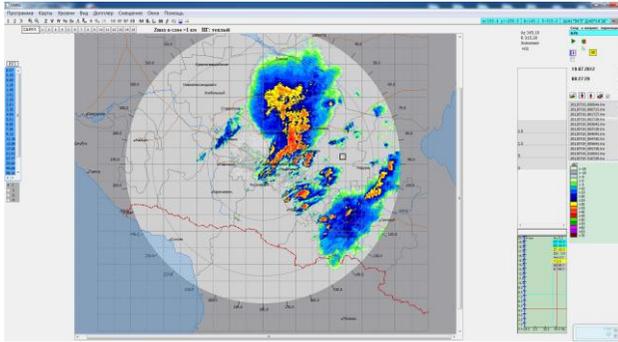


Рис.4. Карта радиолокационной отражаемости.

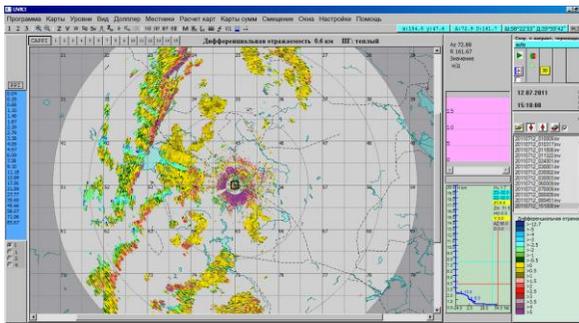


Рис.5. Карта дифференциальной отражаемости.

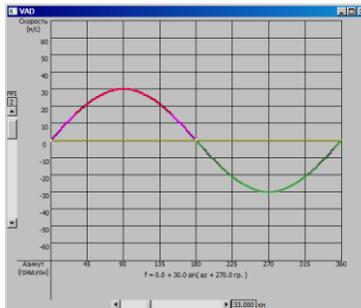


Рис.6. Дисплей азимутальной скорости (VAD).

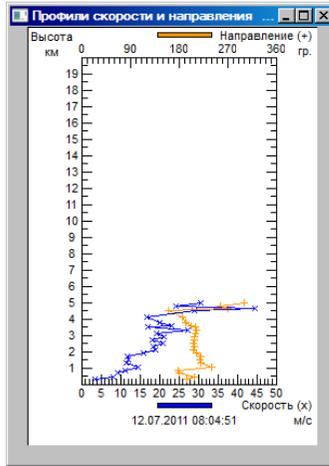


Рис.7. График вертикального изменения скорости и направления ветра.

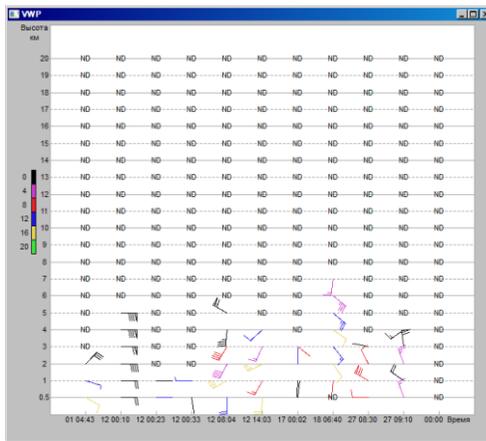


Рис.8. Дисплей изменения со временем профиля ветра (VWP).

Окно трехмерного представления радиолокационной информации ДМРЛ-СМ (рис.9) состоит из области визуализации (справа), палитры и управляющих компонентов (слева).

Разработанная для ДМРЛ-С программа 3D представления информации позволяет детально исследовать радиолокационную структуру облаков в выделенном пространственном объеме.

Масштаб изображения плавно изменяется вращением колесика мыши или перемещением мыши вперед-назад, удерживая среднюю кнопку.

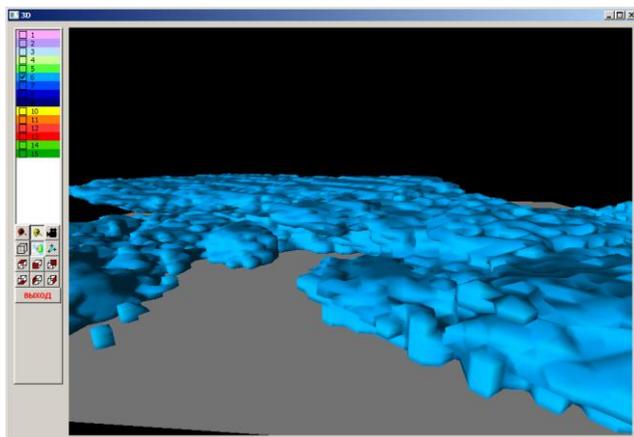


Рис.9. Окно трехмерного представления.

Наклон и вращение области отображения осуществляется при нажатой левой кнопки мышки.

Первый сетевой ДМРЛ-С с программным обеспечением ВОИ «ГИМЕТ-2010» установлен в 2012 году в Ставропольском крае (аэропорт Минеральные Воды) и в настоящее время обеспечивает высокоточной метеоинформацией аэропорт и краевой Гидрометцентр.

**РАСПОЗНАВАНИЕ ОПАСНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
(NEURAL NETWORK) И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ (COMPUTER
VISION)**

В.А. Шаповалов, М.А. Шаповалов

ФГБУ "Высокогорный геофизический институт", г. Нальчик

В последние десятилетия бурно развивается обработка изображений реального времени, которая применяется в составе автоматизированных систем с целью решения задач обнаружения и оценки параметров объектов наблюдения. В сети имеются открытые библиотеки компьютерного зрения

(Computer Vision), в которых присутствуют модули, реализующие современные методы обнаружения и распознавания объектов. В них используются такие известные методы, как корреляционно-экстремальные, контурный анализ, искусственные нейронные сети, усиления простых классификаторов и другие.

Методы компьютерного зрения применяются и к распознаванию облаков, наблюдаемых с помощью метеорологических радиолокаторов или со спутников [1-6].

В данной работе представлены некоторые результаты применения указанных библиотек к распознаванию опасных явлений погоды (ОЯП) [4] по данным метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ-С, МРЛ-5) сети штормового оповещения Росгидромета и противоградовых служб.

Стандартный подход предполагает, что на вход системы обнаружения и распознавания объектов поступает последовательность изображений размерностью от нескольких тысяч до миллионов пикселей с частотой следования, соответствующей системе измерения. Автоматическая система должна определять присутствие объекта на изображении, локализовать его (определять границы области на изображении), а также распознавать тип объекта.

Операция предобработки применяется практически всегда после снятия информации и преследует цель снижения помех на изображении, возникших в результате дискретизации и квантования, а также подавления внешних шумов. Применение фильтров на этом этапе, как правило, призвано улучшить качество обнаружения и распознавания без потери большей части первоначальной информации об объекте.

Для повышения качества обнаружения и качественной фильтрации ложных целей требуется ввести зоны условий обнаружения объектов по доступным признакам. При этом необходимо максимально полно использовать не только априорную, но и апостериорную информацию об источниках помех природного и техногенного характера.

Основное внимание в литературе при освещении вопросов выделения изображений объектов из анализируемого кадра уделено методам, основанным на сегментации изображений, а также корреляционным и разностным методам.

Последовательность действия при распознавании следующая:

1. Предварительная обработка изображения - сглаживание, фильтрация помех, повышение контраста.
2. Бинаризация изображения и выделение контуров объектов.

3. Начальная фильтрация контуров по периметру, площади, коэффициенту формы, фрактальности и так далее.

При наличии четко выраженного объекта на контрастном фоне и отсутствии помех контурный анализ хорошо справляется с распознаванием.

Обнаружение объектов при различных масштабах, углах обзора и условиях может быть реализовано в логике искусственных нейронных сетей высокого порядка.

При этом метод обнаружения и распознавания основан на представлении фрагментов изображений инвариантными признаками (цвет, текстура, яркость) с последующей классификацией нейросетевыми алгоритмами объектов.

Общий алгоритм обработки изображений включает:

- кодирование изображений устойчивыми признаками с последующей их бинаризацией;
- кодирование фрагментов полученного бинарного изображения признаками второго порядка;
- нейросетевой алгоритм распознавания и алгоритмы обучения нейронной сети (НС) классификатора.

Получение бинарного препарата осуществляется кодированием изображения локальными анизотропными признаками с применением градиентных операторов Превитта или Собела [2] с последующим разбиением полученных интенсивностей перепадов яркостей на два класса — анизотропные и изотропные элементы, сравнением их с порогом.

Значения порога вычисляются автоматически из условия сохранения соотношения изотропных и анизотропных элементов изображения, что уменьшает влияние шумов и уровня освещенности сцены на режим работы системы

Инвариантность к масштабу, повороту и положению достигается кодированием фрагментов бинаризованного изображения признаками второго порядка на основе текстурных свойств и использованием свойства обобщения НС в режиме распознавания [3].

Классификатор системы обнаружения и распознавания работает по нейросетевому принципу, имитируя НС типа персептрон или НС типа Кохонена с выходным слоем Гроссберга [5].

Обучение системы и анализ областей происходит согласно теории самоорганизующихся нейронных сетей Кохонена. Длина входного вектора имеет размер n . Каждая входная область масштабируется к размеру 32×32 пикселей. В таком случае $n = 1024$. На рис.1 представлена схематично структура НС.

Во время работы программы в режиме обнаружения и распознавания с предварительно обученной НС, кроме реальных, наблюдается наличие ложных объектов - артефактов (рис.2).

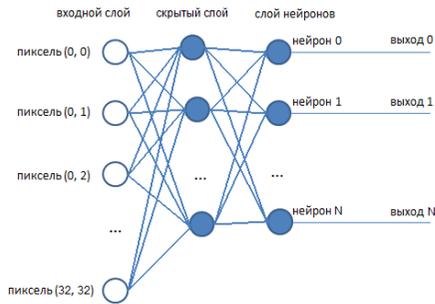


Рис.1. Схема структуры нейросети.

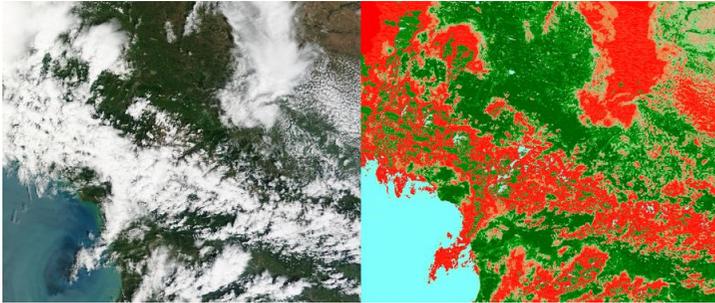


Рис.2. Результат сегментации изображения: слева — исходное спутниковое изображение; справа — сегментированное нейронной сетью изображение облачности.

Для борьбы с ними применяется несколько способов. Первым и обязательным способом является дообучение НС классификатора, которое заключается в добавлении артефактов в обучающий набор фоновых объектов, а затем в полном переобучении или дообучении (модификации весовых коэффициентов) НС. Процесс обучения в зависимости от схожести объектов обучающих наборов выполняется за различное количество итераций. При добавлении новых артефактов в обучающий набор в определенный момент происходит срыв сходимости процесса обучения НС, что приводит к невозможности устранения артефактов этим способом [6].

Вторым способом является применение каскадного соединения двух и более НС. Задачей дополнительных каскадов является подавление ложных

объектов. Это достигается их обучением на обучающих наборах, где в фоновые объекты добавляются только артефакты.

Для устранения эффектов кратковременного появления артефакта или неверного определения класса объекта применяется статистическая обработка изображений по нескольким кадрам.

Обучение НС проводится по изображениям целевых объектов, произвольно расположенных в используемых фрагментах и по случайному набору объектов фона. На рис.3 приведен пример сокращенного обучающего набора объектов и фона.



Рис. 3. Сокращенные тренировочные наборы для обучения нейронной сети: слева — изображения объекта; в центре и справа — изображения фонов.

Можно обучать систему исходя из разных условий (время года, покров поверхности, ракурс снимка и т.п.), объединяя их в отдельные схемы, чтобы при схожих снимках для анализа подавать в требуемую обученную сеть.

Аналогичный подход применим и к радиолокационным данным.

Задача распознавания в данном случае упрощается, так как поступающие изображения являются синтезированными на основе данных метеорологических радиолокаторов. Остается только определить на исходном изображении множество областей, в которых находится искомый объект, а также количество данных областей.

Выбирая порог для бинаризации (рис.4) система делает вывод о присутствии объектов на изображении, после чего осуществляется их локализация. Затем данные из модуля обнаружения и выделения региона интереса поступают в модуль распознавания, где принимается решение об отнесении объекта к тому или иному классу.

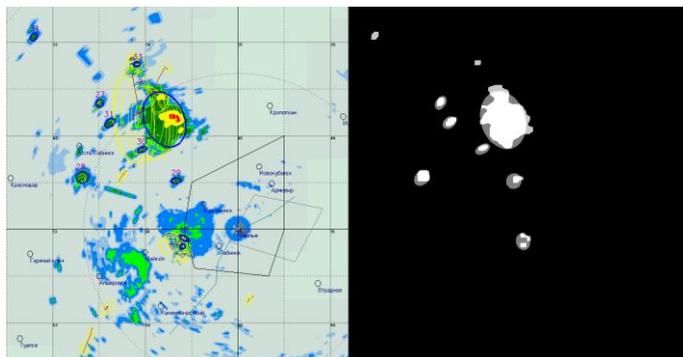


Рис.4. Слежение за грозowymi ячейками на основе пороговой бинаризации (справа) и контурного анализа.

На рис.5 приведен пример нумерации ячеек, за которыми осуществляется контроль в системе распознавания опасных конвективных процессов.

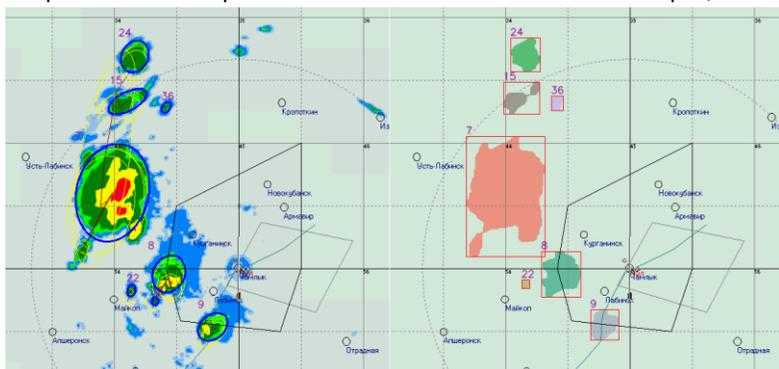


Рис.5. Пример распознавания (справа) и слежения за грозowymi ячейками.

Заключение

Применение современных методов обнаружения и распознавания ОЯП позволяет более эффективно использовать дистанционные методы метеорологической радиолокации.

Особенностью применения изложенных в работе методов является относительно небольшая частота появления исходных изображений с объектами (1 раз в несколько минут).

Изображения метеобъектов отображаются в виде набора карт радиолокационных продуктов и характеризуются большим набором параметров, что эквивалентно наличию нескольких каналов в распознающей системе.

Список литературы

1. Астафуров В.Г., Рассказчикова Т.М., Скороходов А.В. Набор эталонных изображений и текстурных признаков для различных типов облачности по данным MODIS//Тезисы докладов Девятой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Методы и алгоритмы обработки спутниковых данных, Москва, 14–18 ноября 2011. М.: Изд-во ИКИ РАН. 2011. С. 12.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ./ Под ред. Чочиа П.А. - М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
3. Опарин А.Н., Плеханова И.В., Соловьев Н.Г. Распознавание изображений нейронной сетью инвариантно к аффинным преобразованиям // Оптический журнал. 1996. № 10. С. 4985-4992.
4. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. - СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 360 с.
5. Рутковская Д. и др. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. - М., 2004. 452 с.
6. Тишкин Р.В. Нейросетевые алгоритмы идентификации облачности по спутниковым изображениям /Научно-техническая конференция ФГУП «РНИИ КП», посвященная 60-летию предприятия (10–12 октября 2006 г.). Тезисы докладов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. С. 323.

РАСЧЕТ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ ОСАДКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ О СПЕКТРАХ КАПЕЛЬ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА

В.А. Шаповалов, Л.Т. Созаева, М.А. Шаповалов
ФГБУ "Высокогорный геофизический институт", г. Нальчик

В 2010 году в Российской Федерации принят в эксплуатацию современный доплеровский метеорологический радиолокатор с двойной поляризацией сигналов - ДМРЛ-С. В настоящее время интенсивно идет установка ДМРЛ-С на сети аэронавигации. Данный радиолокатор помимо радиолокационной отражаемости метеообъектов, радиальной скорости и ширины

спектра скоростей гидрометеоров, выдает следующие поляризационные параметры: дифференциальную отражаемость, дифференциальную фазу, модуль коэффициента кросскорреляции, линейное деполаризационное отклонение [4, 6, 9, 12, 13].

Как известно, физические свойства дисперсных сред зависят от размеров частиц, их концентрации, фазового состояния. Исследованию этих вопросов посвящено множество работ в нашей стране и за рубежом. Вопросы влияния облачных частиц на электромагнитное излучение (ЭМИ) подробно рассмотрены в работах [3, 5, 11]. Для изучения различных прикладных вопросов, связанных с прохождением ЭМИ в таких средах, необходима информация о микроструктуре зондируемой облачности. Для получения такой информации используются данные измерений и результаты моделирования по микрофизическим моделям облаков [1,2].

Целью данной работы являлось исследование поляризационных характеристик конвективных облаков в С диапазоне для расширения сферы применимости этих параметров как в исследованиях по физике облаков, так и в штормооповещении. В частности, в работе решались следующие вопросы:

- разработка программных средств расчета поглощающих и рассеивающих свойств капель и ледяных кристаллов различных размеров на длинах волн 3,14; 5,6; 10,15 см;
- расчет спектров капель и ледяных кристаллов в конвективных облаках в различные моменты времени на основе трехмерной математической модели с детальной микрофизикой [2];
- расчет радиолокационной отражаемости модельного конвективного облака по вертикальному и горизонтальному поляризационным каналам в различные моменты времени, оценка величины дифференциальной отражаемости капель и др.

Описание трехмерной численной модели конвективного облака, используемой для расчета микроструктурных характеристик и радиолокационной отражаемости, приведено в работах [1,2]. Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска, в которых учитывается адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов.

Модель описывает следующие микрофизические процессы: коагуляцию капель с каплями, аккрецию капель с кристаллами, замерзание капель, седиментацию капель и кристаллов, а также их перенос воздушными потоками. На каждом временном шаге решаются кинетические уравнения для функций распределения по массам капель $f_1(x,y,z,m,t)$, ледяных частиц

$f_2(x,y,z,m,t)$ и мелких ледяных осколков $f_3(x,y,z,m,t)$, образующихся при замерзании переохлажденных капель.

Модель позволяет рассчитывать эволюцию со временем динамических, термодинамических и электрических параметров облака, а также спектров капель и кристаллов в облаке. Основной программный модуль обеспечивает инициализацию модели и расчет параметров облака, определенных в узлах пространственной сетки и сетки по массе, в цикле по времени.

В модели принят следующий физический принцип возникновения разности отраженных сигналов в вертикальном и горизонтальном каналах двухполяризационного метеорологического радиолокатора.

Капли осадков деформируются при их падении в воздухе, они становятся приплюснутыми в вертикальной плоскости. Чем крупнее капля, тем больше она расплющивается, и тем больше становится вероятность ее разбрызгивания на несколько более мелких частиц [2]. Пусть a - вертикальный размер деформированной в воздушном потоке капли, b - ее горизонтальный размер, причем, $a \leq b$. Средние значения параметров эллипсоида вращения с учетом вибраций капель могут быть представлены выражением:

$$a = b \cdot (1,012 - 0,144 \cdot d - 1,03 \cdot d^2), \quad (1)$$

полученным независимо несколькими авторами [7,8,10].

Из условия равенства объемов сферической и деформированной каплей $d^3 = a^2 b$, с учетом (1), получено выражение для горизонтальных размеров деформированных каплей b в зависимости от диаметра сферических каплей d :

$$b = d \cdot (1,012 - 0,144 \cdot d - 1,03 \cdot d^2)^{-2/3}. \quad (2)$$

Таким образом, выражения (1) и (2) позволяют вычислить размеры a и b деформированных каплей, исходный диаметр которых d .

Для всех интервалов размеров каплей, используемых в трехмерной модели облака [1,2], вычислены значения a и b . При этом для мелких каплей все три размера равны, а для крупных - заметно отличаются друг от друга ($a < d < b$). Максимальное отношение $a/b = 0.25$ для самых крупных каплей диаметром более 6 мм.

Процессы распространения и ослабления оптического излучения в атмосфере описывают с помощью оптических характеристик: коэффициентов ослабления, поглощения и рассеяния, оптической толщи среды, индикатрисы излучения, геометрических параметров, связанных с обратным рассеянием, поляризационных характеристик и т.д. [3,5].

По теории аэрозольного рассеяния электромагнитного излучения Ми коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения принято выражать через соответствующие факторы эффективности аэрозольного ослабления, рассеяния и поглощения. Сечение обратного рассеяния рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{обп} = \pi r^2 K_{обп}(r, \lambda, m), \quad (3)$$

где r - радиус частицы; λ - длина волны; $K_{обп}$ - фактор эффективности обратного рассеяния; $m=n+i\chi$ - комплексный показатель преломления частицы (n -показатель преломления, χ -показатель поглощения).

Радиолокационная отражаемость в dBZ вычисляется по формуле:

$$Z = k \int_0^{\infty} \sigma_{обп}(r, \lambda) \cdot f(r) \cdot dr, \quad (4)$$

$$k = \frac{10^{12} \lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^{-2}, \quad k_{5,6} = 3,456 \cdot 10^{12} \text{ (для капель)}.$$

Коэффициенты эффективности обратного рассеяния $K_{обп}(r, \lambda, m)$ рассчитываются по формулам, предложенным в [5].

Авторами рассчитаны таблицы факторов обратного рассеяния капель радиусом от 2 мкм до 4 мм для длин волн сантиметрового диапазона 3,14 см, 5,6 см, 10,15 см и ледяных кристаллов с эффективным радиусом от 2 мкм до 2 см.

Результаты расчетов для некоторых размеров капель приведены в таблице 1.

Аналогичные значения сечений обратного рассеяния вычислены для деформированных капель вертикальным размером a , и горизонтальным размером b .

По данным температурно-ветрового зондирования атмосферы рассчитаны микроструктурные характеристики конвективных облаков в различные моменты времени.

Расчеты проводились в прямоугольной пространственной области. Размеры области составляли 60км по горизонтали и 16км по вертикали. Шаг сетки по координатам X, Y был равен 500 м, по Z - 200 м, шаг по времени равен 6 с. Облако инициировалось заданием импульса у поверхности земли с перегревом $\Delta T=1-2$ °C, форма импульса – объемный диск.

Таблица 1. Сечения обратного рассеяния капель трех характерных размеров

r (м)	λ (см)	$\sigma_{обр}$ (м ²)
3.908E-06	3,14	6,189E-25
	5,6	6,592E-26
	10,15	6,516E-27
3.970E-04	3,14	6,716E-13
	5,6	7,196E-14
	10,15	7,145E-15
3.565E-03	3,14	5,714E-07
	5,6	9,838E-08
	10,15	2,607E-09

В каждый момент времени с использованием полученных по модели функций распределения капель $f_1(x,y,z,t)$ и предварительно вычисленных таблиц сечений обратного рассеяния, рассчитывались значения радиолокационной отражаемости Z , Z_a , Z_b на длине волны радиолокатора ДМРЛ-С для неполяризованного излучения (Z), вертикально поляризованного излучения (Z_a) и горизонтально поляризованного (Z_b). Получены значения дифференциальной отражаемости Z_d . Некоторые результаты расчетов приведены на рисунках 1-7.

На рис.1 приведены изолинии вертикальных потоков в облаке, изоповерхности водности и ледности на 40-й минуте. Облако достигает стадии максимального развития.

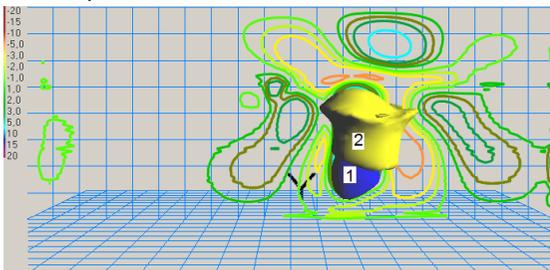


Рис.1. Строение конвективного облака в момент времени $t=40$ мин. На рисунке приведены: изолинии восходящих и нисходящих потоков в вертикальной плоскости по направлению его движения; изоповерхность водности 2.0 г/м^3 (1); ледности 2.0 г/м^3 (2).

Максимальное значение восходящего потока $W_{max} = 18$ м/с отмечается на уровне $z=5,8$ км, нисходящие потоки составляют -10 м/с. Восходящий поток имеет небольшой наклон по направлению ведущего потока. Водность достигает 6 г/м³ на уровне $4,4$ км, ледность – 4 г/м³ на уровне $z=5,8$ км. Ячейки горизонтальной и вертикальной вспомогательных сеток на рисунках 1,3-5 имеют размер 2×2 км.

Распределение капель и ледяных частиц по размерам на 40-й минуте развития в области повышенной водности ($z=4,4$ км) и повышенной ледности ($z=5,8$ км) приведено на рис.2.

Из рис.2а видно, что в области повышенной водности присутствуют крупные капли, которые, как описано выше, деформируются при падении, и вследствие этого появляются условия для возникновения разности в мощности отраженного радиоэхо по вертикальному и горизонтальному поляриационным каналам метеорологического радиолокатора (ДМРЛ-С).

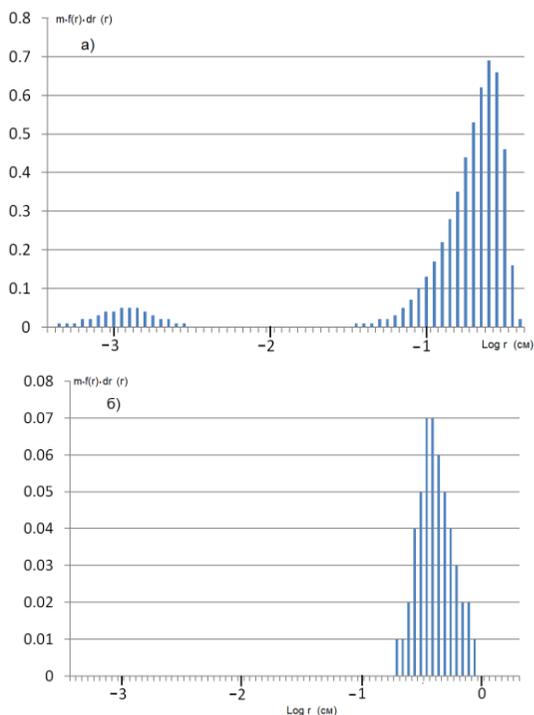


Рис. 2. Спектры капель (а) и кристаллов (б) в момент времени $t=40$ мин. По вертикальной оси отложена водность в граммах в каждом интервале размеров частиц, по горизонтали отложен логарифм радиуса частиц в сантиметрах.

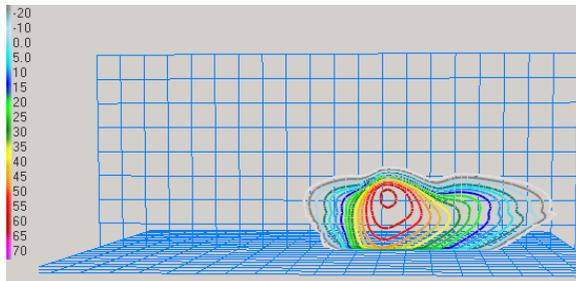


Рис. 3. Отражаемость капель по вертикальному поляризованному каналу на 40-й минуте, $Z_a \max = 51 \text{ dBZ}$ (уровень 4,4 км).

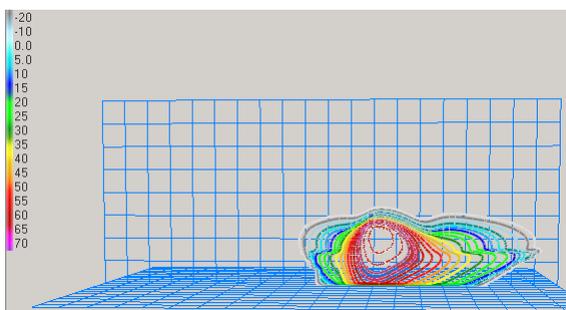


Рис.4. Отражаемость капель по горизонтальному поляризованному каналу на 40-й минуте, $Z_b \max = 69 \text{ dBZ}$ (уровень 4,0 км).

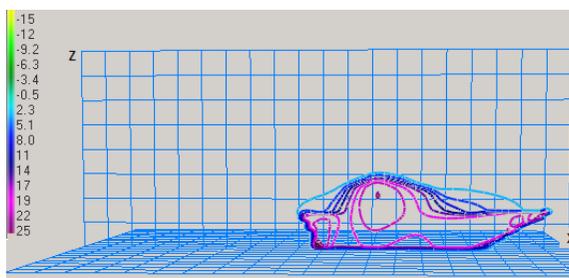


Рис.5. Дифференциальная отражаемость капель в облаке 40-й минуте, $Z_d \max = 18 \text{ dBZ}$ (уровень 4,0 км).

Структура конвективных облаков по результатам расчетов неоднородна. Водность и ледность меняются в мощном кучевом облаке от долей грамма до нескольких грамм. Максимальные водность и ледность наблюдаются

вблизи восходящего потока, на периферии облака значения водностей и ледностей на порядки меньше.

В образовании дождевых капель наибольшее значение имеет гравитационный захват, электрические эффекты ускоряют этот процесс в грозовых облаках [2].

По результатам расчетов область деформированных капель может выделяться двухполяризационным ДМРЛ-С достаточно эффективно (значение дифференциальной отражаемости составляет более 10 dBZ). Следует отметить, что осредненное значение отражаемости за счет ширины диаграммы радиолокационного луча будет иметь при дистанционных измерениях меньшие значения, чем приведенные на рисунках максимальные значения, относящиеся к ограниченному объему.

Предложенный в работе подход будет использован для изучения других поляризационных характеристик ДМРЛ-С, сравнения их с данными наблюдений, определения их информативности для возможного включения в критерии идентификации метеорологических явлений.

Список литературы

1. 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.
2. Ашабоков Б.А., Бейтуганов М.Н., Куповых Г.В., Шаповалов А.В., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков//Известия вузов. Северо-Кавказский регион. – 2012. - №6. - С. 65-68.
3. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами.1. - М.: Мир, 1986. - 994 с.
4. Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Жуков В.Ю., Пушков А.А., Щукин Г.Г. Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации//Материалы V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». - Муром, 2012.
5. Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. -Л.: Гидрометеиздат, 1972.-348 с.
6. Рыжков А.В. Поляризационные методы метеорологической радиолокации//Зарубежная радиоэлектроника . -1993. - №4. -С. 18 -28.
7. Beard K.V., Tokay A. A field study of raindrop oscillations: Observations of size spectra and evaluation of oscillation causes//Geophys. Res. Lett. – 1991. - № 18. - P. 2257-2260.

8. Chandrasekar V., Cooper W.A., Bringi V.N. Axis ratios and oscillation of raindrops//J. Atmos. Sci. – 1988. - № 45. - P. 1323-1333.

9. Dusan S. Zrnica and Alexander V. Ryzkov. Polarimetry for Weather Surveillance Radars//Bulletin of the American Meteorological Society. – 1999. - Vol. 80, No. 3. - P. 389 – 406.

10. Kubesh R.J., Beard K.V.. Laboratory measurement of spontaneous oscillations for moderate-size raindrops//J. Atmos. Sci. -1993. -№ 50. - P.1089-1098.

11. Macke A., Mueller J., and Raschke E. Single scattering properties of atmospheric ice crystals//J. Atmos. Sci. - 1996. - V. 53. - P. 2813 - 2825.

12. V.M. Melnikov. Statistics of the polarimetric variables estimated in the AHV and AHV modes//Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2011. - Vol. 50. - P. 859.

13. A. Zahrai and D.S. Zrnica. The 10-cm-Wavelength Polarimetric Weather Radar at NOAA's National Severe Storms Laboratory//Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 1993. - Vol. 10, № 5. – P. 649-662.

НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ЗАДАЧИ ТИПА СТЕФАНА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Ф.Х. Увижева

ФГБУН Институт информатики и проблем регионального управления

КБНЦ РАН, г. Нальчик, e-mail: fatimauvizheva@mail.ru

При решении многих важных задач науки, техники и производства, в частности:

- задача о промерзании почвы;
- задача о кристаллизации расплава при погружении в него пластинки;
- задача о растворении пузырька газа в жидкости;
- задача об отвердевании охлаждающегося жидкого шара

и многих других, возникают математические задачи типа Стефана, описывающие процесс распространения тепла в средах с изменяющимся фазовым состоянием.

В частности, промерзание почвы – это распространение в почве в холодный период года нулевой и отрицательной температур.

Глубина промерзания зависит от многих характеристик таких, как: тип почвы, теплоемкость, теплопроводность и влажность почвы, наличие обработки почвы, толщина снежного покрова, наличие растительности, предохраняющих почву от сильного выхолаживания.

Глубина промерзания является одним из важных факторов, определяющих условия выживания зимующих культур, а также определяющих сток талых вод в весенний период, который влияет на увлажнение почвы после схода снежного покрова. Глубокое промерзание препятствует проникновению талой воды в нижние слои почвы.

Известно, что одним из опаснейших факторов зимнего периода является низкие отрицательные температуры. Устойчивость к их воздействию у растений озимых культур называется морозостойкостью и колеблется в зависимости от культуры, сорта, возраста и состояния растений, а еще - от этапа перезимовки в довольно широких пределах. Итог зимовки зависит от силы мороза, генетических особенностей сорта, а также условий, которые смягчают действие стрессора. Прежде всего, это толщина снежного покрова, глубина промерзания почвы, постепенность снижения температуры, а также технологические мероприятия, способствующие закалке растений. В условиях неустойчивой погоды в зимний период, когда оттепели сменяются морозами и выпадают дожди, возможно образование на посевах ледяной корки. Бывают всякие ледяные корки, притертые к почве, вмержшие в грунт, а еще - разной толщины и продолжительности залегания. Растения из-за длительного пребывания под притертой ледяной коркой повреждаются, а иногда и полностью погибают вследствие нарушения газообмена в тканях. Значительно усиливает корка и влияние низких температур, поскольку является активным проводником холода: без снежного покрова под коркой растения вымерзают. Наибольший вред посевам наносит ледяная корка, так как из-за нее более половины площадей озимых приходится пересевать.

Последние зимы показывают актуальность вопроса сохранения жизнеспособности и перезимовки озимых зерновых и кормовых культур. Условия, при которых температура воздуха опускается в отдельных районах значительно ниже нуля, на полях с небольшим снежным покровом часто приводят к частичной или полной гибели озимых, а также зимующих кормовых культур.

При таких условиях своевременность принятия решения о подсеве или пересеве пострадавших полей имеет решающее значение для эффективного использования посевных площадей.

В данной работе исследуется процесс распространения мерзлоты в сложных средах. Данный процесс описывается с помощью задачи типа Сте-

фана. Первая попытка в решении задачи типа Стефана сделана в работе Ж. Ламе и Б. Клапейрона в 1831 году. Существенный шаг в развитии этой проблемы был сделан в 1889 году И. Стефаном в его работе о промерзании грунта, где поставил и решил несколько задач. Как показал И. Стефан, подсчет теплового баланса на границе раздела фаз приводит к знаменитому условию Стефана на подвижной границе.

В настоящее время библиография работ, посвященных проблеме Стефана, насчитывает сотни авторов [1,2,4-6,9,10,12,13].

В данной работе рассматриваются различные обобщенные задачи Стефана для уравнения Фурье

$$U_t = U_{xx},$$

которое в области $\Omega = \{(x, t): 0 < x < s(t), t > 0\}$ является моделью уравнения переноса второго порядка параболического типа с двумя независимыми переменными x и t .

Обобщенные задачи отличаются краевыми условиями по пространственным координатам и времени, а также условием Стефана на подвижной границе, т.е. являются различными аспектами одномерной однофазной и двухфазной задач.

1. В области $\Omega = \{(x, t): 0 < x < s(t), 0 < t < T\}$ рассмотрим задачу типа Стефана в следующей постановке:

$$\begin{aligned} U_t(x, t) &= U_{xx}(x, t), & 0 < x < s(t), 0 \leq t \leq T, \\ U(x, t)|_{x=0} &= \varphi_1(t), & 0 \leq t \leq T, \\ U(x, t)|_{x=s(t)} &= \varphi_2(t - \tau), & 0 \leq t \leq T, \\ U_x(x, t)|_{x=s(t)} &= \frac{ds}{dt}, & 0 \leq t \leq T, \\ s(0) &= 0, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где функции $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ – известные и знакопостоянные в рассматриваемой области Ω числа, T – постоянный параметр.

Задача Стефана состоит в определении функций $U(x, t)$ и $s(t)$ в классе достаточно гладких функций, удовлетворяющих условиям постановки задачи (1.1) в рассматриваемой области.

В предположении существования единственности решения, ищем его для задачи (1.1) в виде:

$$U(x, t) = A + B\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right), \quad (1.2)$$

где $\Phi(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-y^2} dy$ – интеграл ошибок; A U B – неизвестные постоянные параметры, которые определяются путем удовлетворения решения (1.2) краевым условиям задачи (1.1):

$$U(x, t)|_{x=0} = A + B\Phi(0) = \varphi_1, \quad (1.3)$$

$$U(x, t)|_{x=s(t)} = A + B\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right)|_{x=s(t)} = \varphi_2.$$

Соотношения (1.3) должны иметь место при любых значениях t . Это возможно лишь при выполнении равенства

$$s(t) = \alpha\sqrt{t}, \quad (1.4)$$

где α - некоторая неизвестная величина.

Из (1.3) и (1.4) получаем:

$$A + B\Phi(0) = \varphi_1,$$

$$A + B\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \varphi_2.$$

Решая систему уравнений относительно A и B , имеем:

$$A = \varphi_1, \quad (1.5)$$

$$B = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right)},$$

откуда, подставляя значения A и B в равенство (1.2), получим

$$U(x, t) = \varphi_1 + \frac{\varphi_2(t-\tau) - \varphi_1}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right). \quad (1.6)$$

Найдем неизвестный параметр α из условия Стефана на подвижной границе:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4t}} \frac{1}{\sqrt{t}} \Big|_{x=s(t)} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{1}{\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{s^2(t)}{4t}}.$$

С другой стороны, согласно (1.4),

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\alpha}{2\sqrt{t}},$$

$$s(t) = \alpha\sqrt{t},$$

поэтому имеет место соотношение

$$\alpha = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\alpha^2}{4}}. \quad (1.7)$$

Следовательно, α является решением трансцендентного уравнения (1.7), которое решается приближенно итерационным методом [3,11].

Таким образом, решение рассматриваемой задачи Стефана представляют равенства (1.6), (1.4) и (1.7).

2. Рассмотрим задачу Стефана в случае, когда условие Стефана, описывающее движение подвижной границы описывается нелинейным уравнением, т.е. в области $\Omega = \{(x, t); 0 < x < s(t), t > 0\}$ рассмотрим однофазную задачу типа Стефана в следующей постановке:

$$U_t = U_{xx} \quad (x, t) \in \Omega,$$

$$as^2 \frac{d^2s}{dt^2} + b \frac{ds}{dt} + \frac{c}{s} = -U_x|_{x=s(t)}, \quad t > 0,$$

$$\begin{aligned} U(x, t)|_{t=0} &= \varphi_0, \\ U(x, t)|_{x=s(t)} &= \varphi_1, \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} s(0) &= s_0, \\ \frac{ds}{dt}(0) &= s_1, \end{aligned}$$

где a, b, c, s_0, s_1 - const; φ_0 и φ_1 - заданные знакопостоянные числа.

В предположении существования единственности решения ищем его для задачи (1.8) в виде

$$U(x, t) = A + B\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right), \quad (1.9)$$

где $\Phi(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-y^2} dy$ - интеграл ошибок; A и B - неизвестные постоянные параметры.

Найдем A и B , используя начальное и граничное условия задачи (1.8). Получим:

$$\begin{cases} A + B = \varphi_0, \\ A + B\Phi\left(\frac{s}{2\sqrt{t}}\right) = \varphi_1. \end{cases} \quad (1.10)$$

Равенства (1.10) должны иметь место при любом значении времени t . Это возможно только при

$$s(t) = \alpha\sqrt{t} \quad (1.11)$$

где α - неизвестный коэффициент.

Из (1.10) и (1.11) получим:

$$\begin{aligned} A &= \varphi_0 - \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1}, \\ B &= \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1}. \end{aligned}$$

(1.12)

Найдем коэффициент α , используя условие Стефана на подвижной границе:

$$\frac{\partial}{\partial x} U(x, t)|_{x=s(t)} = \frac{B}{\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{\alpha^2}{4}}. \quad (1.13)$$

Подставляя значения s из (1.11) в левую часть условия Стефана, получим:

$$\left(a s^2 \frac{d^2 s}{dt^2} + b \frac{ds}{dt} + \frac{c}{s} \right) |_{s=\alpha\sqrt{t}} = \frac{1}{\sqrt{t}} \left(\frac{c}{\alpha} + \frac{b\alpha}{2} - \frac{a}{4} \alpha^3 \right). \quad (1.14)$$

Из (1.13) и (1.14) получим следующее трансцендентное уравнение для определения величины коэффициента α :

$$\frac{c}{\alpha} + \frac{b\alpha}{2} - \frac{a}{4} \alpha^3 = \frac{B}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\alpha^2}{4}}. \quad (1.15)$$

Уравнение (1.15) легко решается известными итерационными методами.

Таким образом, решение рассматриваемой задачи Стефана получаем в виде формул:

$$U(x, t) = \varphi_0 - \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1} + \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1} \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right), \quad (1.16)$$

$$s(t) = \alpha\sqrt{t},$$

$$\frac{c}{\alpha} + \frac{b\alpha}{2} - \frac{a}{4}\alpha^3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{\Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\alpha^2}{4}}.$$

3. Далее стоит задача определения неизвестного коэффициента α из равенств (1.7) и (1.15), которые представляют собой трансцендентные уравнения, которые решаются известными итерационными методами [3, 11].

1) Для простоты расчетов уравнения (1.7), предположим, что $\varphi_2 - \varphi_1 = \Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right)$, после чего оно принимает вид:

$$A_1 = \alpha - \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\alpha^2}{4}}. \quad (I)$$

Первый этап при решении полученного уравнения (I) итерационным методом (отделение корней) проведен графически и представлен на рис.1.

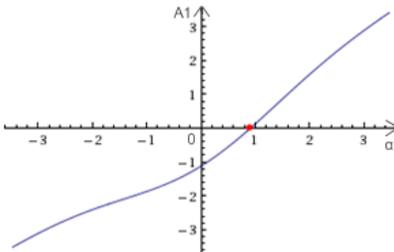


Рис.1.

Второй этап итерационных методов для нахождения корня трансцендентного уравнения проведен итерационным методом Ньютона.

Уточним интервалы, в которых будут находиться корни уравнения. Для этого исходный интервал $[0; 1]$ разобьем на 10 подынтервалов.

$$h_9 = 0 + 9 * \frac{1-0}{10} = 0,9; \quad h_{10} = 0 + (9 + 1) * \frac{1-0}{10} = 1.$$

Поскольку $F(0,9) * F(1) < 0$, то корень лежит в пределах $[0,9; 1]$. Вычисляем значения функций в точке $a = 0,9$. $f(0,9) = -0,0218$, $f''(0,9) = 0,274$.

Поскольку $f(a) * f''(a) < 0$, то $\alpha_0 = b = 1$. Остальные расчеты сведем в таблицу:

№	α	$F(\alpha)$	$dF(\alpha)$	$h = \frac{f(\alpha)}{f'(\alpha)}$
1.	1	0.121	1.4395	0.08405
2.	0.9159	0.00083	1.4191	0.000585

Результат: $\alpha = 0,9159$.

2) Уравнение (1.15) при $a = b = c = 1$ и

$\varphi_1 - \varphi_0 = \Phi\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1$ примет вид:

$$A_2 = \frac{4+2\alpha^2-\alpha^4}{4\alpha} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\alpha^2}{4}}. \quad (II)$$

Первый этап нахождения корней трансцендентного уравнения (II) – графическое отделение корней (рис.2).

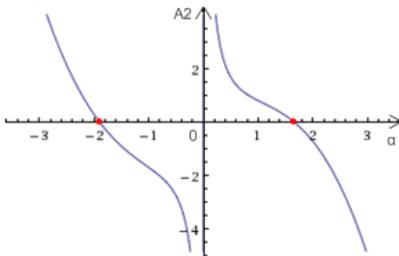


Рис.2.

Значения второго уравнения получаем, используя комбинированный метод (метод хорд и метод Ньютона), тем самым ускоряя процесс сходимости.

В результате получаем: $\alpha = 1,6634$; $\alpha = -1,8965$.

Таким образом, получены значения неизвестного коэффициента α для обоих случаев. Подставляя эти значения в искомые решения (1.6) и (1.16), можно получить аналитическое решение для каждой из двух задач. Значения функции ошибок $\Phi(x)$ известны из справочных материалов.

Список литературы

1. Гусейнов Ш.Э. Метод сведения обобщенной задачи Стефана к нелинейному интегро-дифференциальному уравнению типа Вольтерра//Applied mathematics and mathematical physics. Computer Modelling and New Technologies. – 2006. - Vol. 10, №2. - С.57-67.
2. Данилюк И.И. О задаче Стефана//Успехи математических наук. – 1985. – Т. 40, Вып. 5. - С. 133-185.

3. Калажоков Х.Х., Калажоков А.Х. Некоторые приемы вычисления границ алгебраических уравнений//Известия КБНЦ РАН. -2012. - №5(49). - С.13-24.
4. Лейбензон Л.С. К вопросу об отвердевании земного шара из первоначального расплавленного состояния//Известия АН СССР. Серия «География и геофизика». – 1939. - №7.
5. Мейрманов А.М. Задача Стефана. - Новосибирск: Наука, 1986.
6. Меламед В.Г. Сведение задачи Стефана к системе обыкновенных дифференциальных уравнений//Известия АН СССР. Серия «Геофизика». – 1958. - №7.
7. Нахушев А.М. Дробное исчисление и его применение. - М.: Физматлит, 2003.
8. Нахушев А.М. Нагруженные уравнения и их применение. - М.: «Наука», 2012.
9. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана. - Рига: Звайгзне, 1967.
10. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. - М.: «Наука», 1966.
11. Трауб Дж. Итерационные методы решения уравнений. - М.: «Мир», 1985.
12. Фридман А. Уравнения с частными производными параболического типа. - М.: Мир, 1968.
13. Cannon J.R., Douglas J., Hill C.D. A multi- boundary Stefan problem and the disappearance of phases//Math. Mech. – 1967. - V.17. - P. 21-33.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛО– И МАССОПЕРЕНОСА В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Ф.Х. Увижева

*ФГБУН Институт информатики и проблем регионального управления
КБНЦ РАН, г. Нальчик, e-mail: fatimauvizheva@mail.ru*

Неоднородные среды такие, как атмосфера, почва и т.д., широко распространены в природных, технических объектах и в технологических процессах.

При исследовании режимов переноса различных субстанций в указанных объектах методом математического моделирования приходится исполь-

зывать различные физические характеристики процесса. Эти характеристики в соответствии с принятой моделью входят в коэффициенты дифференциальных уравнений, начальные и граничные условия, а также в геометрические характеристики области задания уравнений.

Поэтому разработка и обоснование математических моделей различных процессов часто называют идентификацией.

Таким образом, при математической постановке задачи происходит обеспечение модели необходимой входной количественной информацией, т.е. определяются (оцениваются) входящие в модель неизвестные характеристики (параметры модели).

Следовательно, определение физических характеристик тепло - и массопереноса в неоднородной среде по известным свойствам ее составляющих представляет большой интерес.

В предположении, что нерегулярность неоднородной среды имеет в некотором смысле статистический характер, введем понятие эффективного коэффициента теплопроводности и диффузии неоднородной среды.

В настоящее время в научной литературе описывается два направления исследований:

- 1) определение коэффициентов переноса тепла и массы в неоднородных средах при определенных предположениях относительно геометрии включения [2];
- 2) определение эффективных коэффициентов переноса тепла и массы на основе решения обратных задач [1,5].

Настоящая работа является дальнейшим развитием указанных направлений исследований.

1. Операторы осреднения и их применение для определения эффективных параметров теплопереноса в неоднородных средах

Для простоты дальнейших рассуждений в качестве неоднородной среды рассмотрим двухкомпонентную смесь, состоящую из включений, вкрапленных в однородную матрицу. Пусть по составу все включения одинаковы, но могут различаться объемом, формой и ориентацией.

Введем следующие обозначения:

- $T(t, x)$ – температура неоднородной среды в точке x в момент времени t ;
- λ_1 – коэффициент теплопроводности матрицы;
- λ_2 – коэффициент теплопроводности включений;
- ω – объем осреднения.

Поле температуры \bar{T} , осредненное по объему ω , окружающее точку x в момент времени t , определяется формулой

$$\bar{T}(t, x) = \frac{1}{\omega} \int_{\omega} T(t, x + \xi) d\xi, \quad (1.1)$$

где ω - произвольный объем, содержащий большое количество включений.

Объем ω складывается из объема матрицы ω_1 и объема всех включений ω_{2i} в рассматриваемом объеме.

Осредненное поле температуры неоднородной среды можно записать в виде:

$$\bar{T}(t, x) = (1 - f)\bar{T}_1(t, x) + f \sum_i \omega_i \bar{T}_{2i}(t, x), \quad (1.2)$$

где

$$\bar{T}_1(t, x) = \frac{1}{\omega_1} \int_{\omega_1} T(t, x + \xi) d\xi,$$

$$\bar{T}_{2i}(t, x) = \frac{1}{\omega_{2i}} \int_{\omega_{2i}} T(t, x + \xi) d\xi,$$

f - доля объема, занятая включениями.

$$f_{2i} = \frac{\omega_{2i}}{\omega}, \quad \omega_i = \frac{f_{2i}}{f},$$

ω_{2i} - объем i -того включения.

Аналогично, выражение для усредненного потока тепла в неоднородной среде примет вид:

$$\bar{q}(t, x) = (1 - f)\bar{q}_1(t, x) + f \sum_i \omega_i \bar{q}_{2i}(t, x). \quad (1.3)$$

Предположим, что для матрицы и включения неоднородной среды имеют место формулы:

$$\bar{q}_1(t, x) = \lambda_0 \cdot \lambda_1 \frac{\partial T_1(t, x)}{\partial x}, \quad (1.4)$$

$$\bar{q}_2(t, x) = \lambda_0 \cdot \lambda_2 \frac{\partial T_2(t, x)}{\partial x},$$

где λ_1 - коэффициент теплопроводности матрицы;

λ_2 - коэффициент теплопроводности включений;

λ_0 - поправочный коэффициент.

Эффективный коэффициент теплопроводности λ_{12} неоднородной среды определяется соотношением:

$$\bar{q}(t, x) = \lambda_0 \cdot \lambda_{12} \frac{\partial T(t, x)}{\partial x}. \quad (1.5)$$

Заметим, что в случае статистически однородной среды λ_{12} не зависит от пространственных координат.

Из приведенных выше формул можно получить соотношение:

$$(1-f)(\lambda_{12} - \lambda_1) \frac{\partial T_1(t,x)}{\partial x} + f \sum_i \omega_i (\lambda_{12} - \lambda_2) \frac{\partial T_2(t,x)}{\partial x} = 0. \quad (1.6)$$

Предположим, что средние поля градиентов температуры связаны линейным соотношением

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_i \frac{\partial T_1}{\partial x}. \quad (1.7)$$

Из (1.6) и (1.7) получаем:

$$(1-f)(\lambda_{12} - \lambda_1) + f(\lambda_{12} - \lambda_2) \sum_i \omega_i \lambda_i = 0.$$

В заключение рассмотрим некоторые формулы для эффективного коэффициента теплопроводности неоднородной среды:

1) *Формула Максвелла - Гарнетта (1904 г.)*

$$\lambda_{12} = \frac{(1-f)\lambda_2 + f\beta\lambda_1}{1-f+f\beta}, \quad (1.8)$$

где β – постоянный параметр.

2) *Формула Браггемана (1935 г.)*

$$f \frac{\lambda_2 - \lambda_{12}}{\lambda_2 - 2\lambda_{12}} + (1-f) \frac{\lambda_1 - \lambda_{12}}{\lambda_1 - 2\lambda_{12}} = 0. \quad (1.9)$$

2. Задача тепло- и массопереноса в пористой среде с переменными физическими параметрами

Рассмотрим одномерную нестационарную задачу переноса тепла и вещества в пористой двухфазной и двухкомпонентной среде с учетом изменения коэффициента пористости за счет фазовых превращений компонентов.

Для количественного описания динамики поровой структуры среды используется кинетическое уравнение, описывающее изменения функций распределения (спектр) пор по объемам во времени за счет фазовых переходов [4].

Математическая формулировка задачи.

Дана система уравнений переноса задачи переноса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \chi \frac{\partial T}{\partial x} - l \frac{d}{dt} \left(\int_0^\infty \omega f(\omega, t) d\omega \right), \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial q}{\partial x} + n \frac{d}{dt} \left(\int_0^\infty \omega f(\omega, t) d\omega \right), \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + [q_H(T) - q(x, t)] \frac{\partial}{\partial \omega} [a(\omega) f(\omega, t)] = 0. \quad (2.3)$$

Начальные и краевые условия:

$$\begin{aligned} T(0, x) &= T_0(x), & q(0, x) &= q_0(x), \\ f(0, \omega) &= f_0(\omega), \end{aligned} \quad (2.4)$$

(2.5)

$$T(t, 0) = \varphi_0(t), \quad q(t, 0) = \psi_0(t).$$

$$T(t, x_1) = \varphi_1(t), \quad q(t, x_1) = \psi_1(t). \quad (2.6)$$

Здесь $\{0 < x < x_1, 0 < \omega < \infty, t > 0\}$ - область, где рассматривается задача; $T(t, x), q(t, x)$ - температура и массовая концентрация вещества, соответственно; $f(t, \omega)$ - функция распределения пор по объемам ω в единице объема пористой среды; $\rho = (1 - \Omega)\rho_1 + \Omega\rho_2$ - плотность пористой среды; ρ_1 - плотность первого компонента; ρ_2 - плотность второго компонента; c - теплоемкость среды; $\Omega = N_0 \int_0^\omega \omega f(t, \omega) d\omega$ - суммарный объем порового пространства в единице объема среды; N_0 - число пор в единице объема среды;

$$l = \frac{L\rho_1 N_0}{\rho c},$$

где L - скрытая теплота фазовых переходов;

$$n = \frac{\rho_1 N_0}{\Omega},$$

χ, D - коэффициенты теплопроводности и диффузии вещества, соответственно; $q_H(T), a(\omega)$ - положительные заданные функции.

Начальные и краевые условия (1.4)-(1.6) удовлетворяют всем необходимым условиям гладкости и условиям согласования.

Как известно [2], в пористых средах коэффициент теплопроводности зависит от коэффициента пористости сложным образом.

В случаях, когда поры имеют сферическую форму или являются эллипсоидами вращения, для зависимости коэффициента теплопроводности от коэффициента пористости имеем, соответственно:

$$(1 - \Omega)\left(\frac{\chi}{\chi_1}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\chi_2 - \chi}{\chi_2 - \chi_1}, \quad (2.7)$$

$$(1 - \Omega)\left(\frac{\chi}{\chi_1}\right)^{\frac{1}{2} - \frac{2\beta^2}{2(1+\beta)}} \left[\frac{(2-\beta)\chi + (1+\beta)\chi_2}{(2-\beta)\chi_1 + (1+\beta)\chi_2} \right]^{\frac{2\beta^2}{(1+\beta)(2-\beta)}} = \frac{\chi_2 - \chi}{\chi_2 - \chi_1}, \quad (2.8)$$

где χ_1, χ_2 - коэффициенты теплопроводности первого и второго компонентов среды, соответственно, β - величина, характеризующая соотношения полуосей эллипсоида вращения.

Таким образом, математическая формулировка задачи переноса тепла и вещества в пористых средах с учетом фазовых превращений, зависимости коэффициента теплопроводности от коэффициента пористости и изменения пористости со временем принимает вид (2.1)-(2.8).

Рассмотрим некоторые вопросы преобразования задачи (2.1)-(2.6).

Для этого решим задачу Коши (2.3)-(2.5), используя метод редукции к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, и получим:

$$f(t, \omega) = \frac{a \left\{ \Phi^{-1}[\Phi(\omega)] - \int_0^t [q_H - q] dt \right\}}{a(\omega)} *$$

$$* f_0 \left\{ \Phi^{-1}[\Phi(\omega) - \int_0^t [q_H - q] dt] \right\}, \quad (2.9)$$

где

$$\Phi(\omega) = \int_0^\omega \frac{d\omega}{a(\omega)},$$

Φ^{-1} - функция, обратная функции $\Phi(\omega)$.

С учетом выражения (2.9), постановка задачи переноса тепла и вещества в пористой среде с переменными физическими параметрами принимает вид

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \chi}{\partial x} \frac{\partial T}{\rho c} \frac{\partial T}{\partial x} - l \frac{d}{dt} \left(\int_0^\infty \omega f(\omega, t) d\omega \right), \\ \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial q}{\partial x} + n \frac{d}{dt} \left(\int_0^\infty \omega f(\omega, t) d\omega \right), \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\left(\Omega = N_0 \int_0^\omega \omega f(t, \omega) d\omega \right),$$

$$\begin{aligned} T(0, x) &= T_0(x), & q(0, x) &= q_0(x), \\ T(t, 0) &= \varphi_0(t), & q(t, 0) &= \psi_0(t), \\ T(t, x_1) &= \varphi_1(t), & q(t, x_1) &= \psi_1(t), \end{aligned} \quad (2.11)$$

где функции χ и f могут быть найдены из формул (2.7)-(2.9).

3. Постановка задачи преобразования параболической системы тепло- и массопереноса в неоднородных средах

Рассмотрим одномерную нестационарную задачу переноса тепла и вещества в области $\Omega = \{(x, t): 0 < x < l, t > 0\}$ с учетом фазовых превращений, если поле температуры $T(x, t)$ и концентрация вещества $c(x, t)$ в ней описываются в приближении механики сплошной среды следующей системой уравнений параболического типа [3,6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{L}{\rho c_p} m, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + m, \quad (3.2)$$

где $K(x, t)$, $D(x, t)$ - коэффициенты теплопроводности и диффузии вещества, соответственно, $m(x, t)$ - интенсивность источников вещества, L - скрытая теплота фазовых переходов, ρ - плотность среды, c_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Для системы уравнений (3.1), (3.2) решаются различные задачи математической физики при некоторых заданных начальных данных и различных граничных условиях.

В настоящей работе рассматривается новый класс задач, особенностью которых является наличие функциональной связи между зависимыми переменными системы (3.1), (3.2). Указанный класс задач описывает перенос тепла и вещества в двухфазных средах с учетом фазовых переходов в равновесном случае в приближении механики сплошной среды.

Как хорошо известно, в равновесном случае имеет место функциональное соотношение

$$c = f(T), \quad (3.3)$$

Определению вида функций (3.3) для различных двухфазных сред посвящено большое количество публикаций. Так, например, для удельной влажности насыщенности сплошной среды часто используется эмпирическая формула вида:

$$c = \frac{c_0}{T} \exp \left\{ \frac{a + bT}{\alpha + \beta T} \right\}$$

где c_0, a, b, α, β - постоянные величины.

Рассмотрим некоторые вопросы преобразования системы (3.1)-(3.3) и их физическую интерпретацию. В предположении, что функция (3.3) обратима и удовлетворяет всем необходимым условиям гладкости, после некоторых несложных преобразований из (3.2) и (3.3) получаем:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_{np} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + F_{np}(x, t), \quad (3.4)$$

где

$$K_{np} = K \cdot \frac{1 + \frac{DL}{K\theta c_p} f'(T)}{1 + \frac{1}{\theta c_p} f'(T)}, \quad (3.5)$$

$$F_{np} = K \cdot \frac{\frac{DL}{K\theta c_p} f''(T)}{1 + \frac{1}{\theta c_p} f'(T)} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2. \quad (3.6)$$

Следовательно, уравнение (3.4) описывает процесс переноса тепла в среде с приведенным коэффициентом теплопроводности (3.5), в каждой точке которой выделяется тепло с приведенной интенсивностью (3.6). Формулы (3.4)-(3.6) позволяют провести качественный анализ процесса переноса тепла в неоднородных средах с учетом фазовых превращений.

Список литературы

1. Алифанов О.М., Артюхин Е.А, Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: «Наука», 1988. - 288 с.
2. Вейнберг А.К. Магнитная проницаемость, электропроводность, диэлектрическая проницаемость и теплопроводность среды, содержащей сферические и эллипсоидальные включения // ДАН СССР, 1966. Т. 169, №3.

3. Григорян С.С. Об общих уравнениях динамики грунтов // ДАН СССР, 1959.- Т.124. № 2.
4. Калажоков Х.Х. Метод кинетического уравнения в теории процессов тепло- и массопереноса в снежном покрове // Тр. ВГИ. 1967. Вып. 9.
5. Левин В.М. Об оценках эффективных коэффициентов теплопроводности многофазных сред // Журнал прикладной механики и технической физики, 1968. № 2.
6. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло - и массопереноса. – М.: Госэнергоиздат, 1963.

К СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ АТМОСФЕРЕ

Р.Г. Закинян, А.Р. Закинян, А.А. Лукинов

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Введение

При анализе планетарных волн часто пользуются результатами теории волн в приближении мелкой воды [1-4]. Согласно этой теории скорость распространения волн определяется выражением

$$c = \sqrt{gh}, \quad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести (ускорение свободного падения); h – эффективная толщина атмосферы.

Если провести расчеты по формуле (1) для высоты $h = 5$ км, то для скорости планетарной волны получим $c \cong 220$ м/с. Под волнами понимается распространение возмущений изобарической поверхности. Характерное значение скорости распространения барических возмущений в атмосфере порядка $(10 \div 20)$ м/с. Очевидно, что выражение для скорости распространения планетарной волны, представленное формулой (1), не может количественно описывать распространение барических возмущений в атмосфере. А именно это представляет практический интерес при исследовании планетарных волн.

Целью настоящей статьи является применение приближения мелкой воды к теории планетарных волн с учетом зависимости плотности воздуха от функции перегрева.

Основные уравнения

Уравнение движения. Рассмотрим движение сухого воздуха, описываемого уравнением движения идеальной жидкости в неинерциальной системе отсчета, с учетом вращения Земли:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_1} \nabla p + \mathbf{g}_0 + 2[\mathbf{v} \boldsymbol{\omega}_0] + \omega_0^2 \mathbf{R}. \quad (1)$$

Далее рассмотрим плоскость, касательную к поверхности геоида в данной точке поверхности Земли (рис.1). Ось z направим перпендикулярно поверхности геоида. Запишем уравнение (1) в проекциях на оси координат:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_1} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + 2u\omega_{0z} - 2w\omega_{0y}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_1} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + 2(w\omega_{0x} - u\omega_{0z}) + g_0 \sin \alpha' - \omega_0^2 R \sin(\varphi + \alpha'), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_1} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - g_0 \cos \alpha' + 2(u\omega_{0y} - v\omega_{0x}) + \omega_0^2 R \cos(\varphi + \alpha'), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha' = \arctg \frac{\omega_0^2 R_E \sin 2\varphi}{2g_0}$ – угол между касательными к геоиду и к сфере в

данной точке поверхности Земли. На полюсах и на экваторе касательные плоскости сферической и геоидальной модели параллельны, следовательно $\tg \alpha' = 0$, а значит $\alpha' = 0$. На широте $\varphi = 45^\circ$: $\alpha' = 0,1^\circ$.

Проекции угловой скорости вращения Земли:

$$\omega_{0x} = 0, \quad \omega_{0y} = \omega_0 \cos(\varphi + \alpha'), \quad \omega_{0z} = \omega_0 \sin(\varphi + \alpha').$$

В случае геоида имеет место равенство:

$$g_0 \sin \alpha' - \omega_0^2 R \sin(\varphi + \alpha') = 0,$$

которое является условием формирования геоида. Тогда получим систему уравнений

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + 2\omega_0 \omega_z - 2w\omega_0 y, \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) - 2\omega_0 z u, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - g_0 \cos \alpha' + 2\omega_0 y u + \omega_0^2 R \cos(\varphi + \alpha'), \end{aligned} \quad (7)$$

В состоянии равновесия (статики):

$$\begin{aligned} \mathbf{v} = 0, \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} = 0, \\ -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) - g_0 \cos \alpha' + \omega_0^2 R \cos(\varphi + \alpha') = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь ρ_i – плотность воздушной частицы; ρ_e – плотность окружающей воздушную частицу атмосферы; $g = g_0 \cos \alpha' - \omega_0^2 R \cos(\varphi + \alpha')$ – ускорение свободного падения.

Давление можно представить в виде $p = \bar{p} + p'$. Тогда уравнения (5)-(7) запишутся в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right) + 2\omega_0 \omega_z - 2w\omega_0 y, \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right) - 2\omega_0 z u, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) - g_0 \cos \alpha' + 2\omega_0 y u + \omega_0^2 R \cos(\varphi + \alpha'), \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнение состояния. Параметры окружающей атмосферы мы рассматриваем как невозмущенное состояние. Из уравнения состояния сухого воздуха (уравнения Менделеева–Клапейрона для идеального газа) следует:

$$p_i = \rho_i R_d T_i, \quad p_e = \rho_e R_d T_e, \quad (12)$$

где p_i , p_e – давление внутри и снаружи воздушной частицы; T_i , T_e – температура, соответственно, внутри и снаружи воздушной частицы; R_d – удельная газовая постоянная сухого воздуха.

Будем считать, что температура окружающей атмосферы изменяется по закону:

$$T_e(z) = T_{e0} - \gamma z, \quad (13)$$

где γ – градиент температуры окружающего воздуха; T_{e0} – температура окружающего воздуха у земли. Будем также считать, что движение воздушной частицы происходит адиабатически. Тогда температура поднимающейся воздушной частицы будет изменяться по закону:

$$T_i(z) = T_{i0} - \gamma_a z, \quad (14)$$

где T_{i0} – температура поднимающейся воздушной частицы у земли; γ_a – сухоадиабатический градиент температуры. Представим

$$T_i(z) = T_e(z) + \Delta T(z), \quad (15)$$

где $\Delta T(z)$ – функция перегрева. С учетом формул (13) – (15) функция перегрева запишется в виде:

$$\Delta T(z) = \Delta_0 T - \Delta\gamma \cdot z, \quad (16)$$

где $\Delta_0 T$ – значение функции перегрева у земли; $\Delta\gamma = \gamma_a - \gamma$.

Сделаем следующее допущение: $p_i = p_e$. В этом приближении для плотности движущейся воздушной частицы можно записать выражение:

$$\rho_i \cong \rho_e (1 - \alpha \Delta T), \quad (17)$$

где α – коэффициент теплового расширения воздуха, равный $\alpha \cong 1/T_0$, $T_0 = 273$ К.

Правую часть уравнения (11) можно представить в виде

$$\begin{aligned} &\cong -\frac{(1 + \alpha \Delta T)}{\rho_e} \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) - \frac{(1 + \alpha \Delta T)}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) - g_0 \cos \alpha' + 2\omega_{0y} u + \omega_0^2 R \cos(\varphi + \alpha') \cong \\ &\cong -\frac{\alpha \Delta T}{\rho_e} \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) + 2\omega_{0y} u = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) + \alpha g \Delta T + 2\omega_{0y} u. \end{aligned}$$

Таким образом, мы получим систему уравнений

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right) + 2\omega_{0z} u - 2\omega_{0y} v, \quad (18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right) - 2\omega_{0z} u, \quad (19)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) + \alpha g \Delta T + 2\omega_{0y} u. \quad (20)$$

Уравнение неразрывности. Запишем уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (21)$$

в виде

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div} \mathbf{v} = 0. \quad (22)$$

При условии

$$\frac{d\rho}{dt} = 0, \quad (23)$$

уравнение неразрывности сведется к выражению

$$\text{div} \mathbf{v} = 0. \quad (24)$$

В проекциях на оси координат отсутствие дивергенции запишется в виде

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (25)$$

Уравнение поверхности запишем в виде:

$$z_s = \eta(x, y, t). \quad (32)$$

Дифференцируя обе части (32) по t , получим:

$$w_s = \eta_t + u\eta_x + v\eta_y, \quad (33)$$

Линеаризуем систему уравнений (18) – (20), пренебрегая в них вертикальной скоростью по сравнению с горизонтальными проекциями скорости и вертикальными ускорениями:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right) + 2\omega_{0z} u, \quad (34)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right) - 2\omega_{0z} u, \quad (35)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) + \alpha g \Delta T + 2\omega_{0y} u. \quad (36)$$

Линеаризуем уравнение (33):

$$w_s = \eta_t, \quad z = z_s. \quad (37)$$

Интегрируем уравнение (36) по z :

$$p' = \int_0^{\eta} (\rho_e \alpha g \Delta T + 2\omega_{0y} \rho_e u) dz = \alpha \Delta T \cdot \rho_e g \eta + 2\omega_{0y} \overline{\rho_e u \eta}.$$

Линеаризуем полученное выражение:

$$p' = \alpha \Delta T \cdot \rho_e g \eta. \quad (38)$$

С учетом выражения (38) система уравнений (34) – (36) запишется в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \alpha \Delta T \frac{\partial \eta}{\partial x} + 2\alpha \omega_{0z}, \quad (39)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \alpha \Delta T \frac{\partial \eta}{\partial y} - 2\omega_{0z} u, \quad (40)$$

$$p' = \alpha \Delta T \cdot \rho_e g \eta. \quad (41)$$

Вертикальная составляющая скорости у плоской поверхности земли (без учета орографии) равна нулю:

$$w|_{z=-H} = 0. \quad (42)$$

Таким образом, мы получаем систему уравнений (25), (39), (40). Отличие полученной системы уравнений от выражений, приведенных, в частности, в [1, 3], заключается в уравнениях (39) – (41), где вместо выражения $p' = \rho_e g \eta$ получено $p' = \alpha \Delta T \cdot \rho_e g \eta$. Заметим, что это уточнение связано с тем, что нами учтена зависимость плотности воздуха от функции перегрева.

Далее поступим также как и в [1], возьмем производную по x от (39) и по y от (40) и сложим:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -g \alpha \Delta T \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + 2\omega_{0z} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

Введем обозначение для вертикальной проекции вихря

$$\Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (43)$$

Тогда

$$-\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial w}{\partial z} = -g \alpha \Delta T \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + 2\omega_{0z} \Omega_z. \quad (44)$$

Уравнение переноса вихря получается из уравнений движений (39) и (40) дифференцированием (39) по y , а (40) по x и вычитанием полученных выражений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Omega_z}{\partial t} &= -2\omega_{0z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial \Omega_z}{\partial t} &= 2\omega_{0z} \frac{\partial w}{\partial z}.\end{aligned}\quad (45)$$

Отсюда следует, что в линейной теории изменение вертикальной скорости с высотой является причиной зарождения вихря.

Подставляя выражение (45) в уравнение (44), получим

$$\frac{\partial^2 \Omega_z}{\partial t^2} = 2\omega_{0z} g \alpha \Delta T \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) - (2\omega_{0z})^2 \Omega_z. \quad (46)$$

Таким образом, задача свелась к решению системы уравнений (39), (40) и (46).

В общем случае компоненты скорости можно представить в виде

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (47)$$

Здесь первое слагаемое описывает потенциальную составляющую скорости, а второе слагаемое – соленоидальную составляющую. При этом выполняется уравнение неразрывности (24), (25). В частности, из уравнения (25) следует

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (48)$$

т.е. потенциал скорости подчиняется уравнению Лапласа. Вертикальная составляющая вихря равна

$$\Omega_z = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = - \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right). \quad (49)$$

Будем искать решение полученной системы в виде:

$$u = Ue^{-i\omega t}, \quad v = Ve^{-i\omega t}, \quad w = We^{-i\omega t}, \quad \eta = Ze^{-i\omega t}. \quad (50)$$

Тогда

$$\Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \right) e^{-i\omega t} = \Omega_{0z} e^{-i\omega t}. \quad (51)$$

Из уравнений (39), (40) и (25) получим

$$-i\omega U = -g\alpha\Delta T \frac{\partial Z}{\partial x} + 2V\omega_{0z}, \quad (52)$$

$$-i\omega V = -g\alpha\Delta T \frac{\partial Z}{\partial y} - 2\omega_{0z}U, \quad (53)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0. \quad (54)$$

Запишем систему уравнений (52) – (53) в виде системы линейных неоднородных уравнений:

$$i\omega U + 2\omega_{0z}V = g\alpha\Delta T \frac{\partial Z}{\partial x}, \quad (55)$$

$$2\omega_{0z}U - i\omega V = -g\alpha\Delta T \frac{\partial Z}{\partial y}. \quad (56)$$

Дискриминант уравнения равен

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} i\omega & 2\omega_{0z} \\ 2\omega_{0z} & -i\omega \end{vmatrix} = \omega^2 - (2\omega_{0z})^2. \quad (57)$$

Найдем определители для решения системы (55) – (56) по формулам Крамера:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} g\alpha\Delta T \frac{\partial Z}{\partial x} & 2\omega_{0z} \\ -g\alpha\Delta T \frac{\partial Z}{\partial y} & -i\omega \end{vmatrix} = g\alpha\Delta T \left(-i\omega \frac{\partial Z}{\partial x} + 2\omega_{0z} \frac{\partial Z}{\partial y} \right),$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} i\omega & g\alpha\Delta T \frac{\partial Z}{\partial x} \\ 2\omega_{0z} & -g\alpha\Delta T \frac{\partial Z}{\partial y} \end{vmatrix} = -g\alpha\Delta T \left(i\omega \frac{\partial Z}{\partial y} + 2\omega_{0z} \frac{\partial Z}{\partial x} \right).$$

Отсюда

$$U = \frac{\Delta_1}{\Delta_0} = g\alpha\Delta T \frac{2\omega_{0z} \frac{\partial Z}{\partial y} - i\omega \frac{\partial Z}{\partial x}}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2}, \quad (58)$$

$$V = \frac{\Delta_2}{\Delta_0} = -g\alpha\Delta T \frac{2\omega_{0z} \frac{\partial Z}{\partial x} + i\omega \frac{\partial Z}{\partial y}}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2}. \quad (59)$$

Сравнивая полученные равенства с выражениями (47), для амплитуд потенциала скорости и функции тока находим

$$\Phi = g\alpha\Delta T \frac{-i\omega Z}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2}, \quad (60)$$

$$\Psi = g\alpha\Delta T \frac{2\omega_{0z}Z}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2}. \quad (61)$$

Отсюда, для амплитуды вертикальной составляющей скорости получим

$$W = \frac{\partial\Phi}{\partial z} = g\alpha\Delta T \frac{-i\omega}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \frac{\partial Z}{\partial z}. \quad (62)$$

Из уравнения Лапласа для потенциала скорости следует:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0. \quad (63)$$

Решение этого уравнения будем искать в виде

$$Z = \tilde{Z}(z) \exp[i(k_1x + k_2y)]. \quad (64)$$

Тогда для амплитуды возмущения поверхности получим уравнение

$$\frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial z^2} - k^2 \tilde{Z} = 0, \quad (65)$$

где $k^2 = k_1^2 + k_2^2$. Это уравнение имеет решение

$$\tilde{Z} = A_1 e^{kz} + A_2 e^{-kz}, \quad (66)$$

где A_1, A_2 – константы; k – волновое число, величина положительная.

Из граничного условия (42) и уравнения (62) следует, что

$$\frac{\partial \tilde{Z}}{\partial z} = 0, \quad z = -H. \quad (67)$$

Подставляя выражение (66) для амплитуды \tilde{Z} в граничное условие (67), получим

$$A_1 e^{-kH} - A_2 e^{kH} = 0.$$

Отсюда следует, что

$$A_1 = \frac{A}{2} e^{kH}, \quad A_2 = \frac{A}{2} e^{-kH}.$$

Подставляя эти равенства в выражение (66), для амплитуды возмущения получим

$$\tilde{Z} = \frac{A}{2} \left(e^{k(H+z)} + e^{-k(H+z)} \right) = A \cdot \text{ch} \left[k(H+z) \right]. \quad (68)$$

Подставляя в уравнение (46) выражения для η и Ω_z из формул (50) и (51), получим

$$-\omega^2 \Omega_{0z} = 2\omega_{0z} g \alpha \Delta T \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right) - (2\omega_{0z})^2 \Omega_{0z}.$$

С учетом выражения для амплитуды возмущенной поверхности (64) запишем

$$-\omega^2 \Omega_{0z} = -2\omega_{0z} g \alpha \Delta T \left(k_1^2 + k_1^2 \right) \tilde{Z} - (2\omega_{0z})^2 \Omega_{0z},$$

$$\left[\omega^2 - (2\omega_{0z})^2 \right] \Omega_{0z} = 2\omega_{0z} g \alpha \Delta T k^2 \tilde{Z},$$

$$\Omega_{0z} = \frac{2\omega_{0z} g \alpha \Delta T k^2}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \tilde{Z}. \quad (69)$$

Из уравнения (45) следует

$$-i\omega \Omega_{0z} = 2\omega_{0z} \frac{\partial W}{\partial z}.$$

С учетом (62) получим

$$-i\omega \Omega_{0z} = g \alpha \Delta T \frac{-i\omega \cdot 2\omega_{0z}}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2},$$

$$\Omega_{0z} = g \alpha \Delta T \frac{2\omega_{0z}}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}. \quad (70)$$

Из уравнения (37) следует

$$w_s = \eta_t, \quad z = z_s,$$

$$W = -i\omega Z.$$

Подставляя полученное выражение в уравнение (62), получим

$$-i\omega Z = g \alpha \Delta T \frac{-i\omega}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \frac{\partial Z}{\partial z},$$

$$Z = g\alpha\Delta T \frac{1}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \frac{\partial Z}{\partial z}. \quad (71)$$

С учетом выражения (68) запишем для $z = 0$:

$$Z = A \cdot \text{ch}[k(H+z)] \exp[i(k_1x + k_2y)],$$

$$\text{ch}[k(H+z)] = g\alpha\Delta T \frac{k}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \text{sh}[k(H+z)],$$

$$\omega^2 = (2\omega_{0z})^2 + g\alpha\Delta T k \frac{\text{sh}[k(H+z)]}{\text{ch}[k(H+z)]},$$

$$\omega^2 = (2\omega_{0z})^2 + g\alpha\Delta T k \cdot \text{th}(kH). \quad (72)$$

Дисперсионное соотношение (72) представим в виде

$$\omega^2 = (2\omega_{0z})^2 + k^2 \frac{g\alpha\Delta T}{k} \text{th}(kH),$$

$$\omega^2 = (2\omega_{0z})^2 + k^2 c_0^2,$$

где

$$c_0 = \sqrt{\frac{g\alpha\Delta T}{k} \text{th}(kH)} \quad (73)$$

– скорость волны в отсутствии вращения Земли.

Фазовая скорость волны равна

$$\frac{\omega^2}{k^2} = c_0^2 + \frac{(2\omega_{0z})^2}{k^2}, \quad c = \sqrt{c_0^2 + \frac{(2\omega_{0z})^2}{k^2}}. \quad (74)$$

Из условия $kH \ll 1$ найдем скорость волны в приближении мелкой воды. Так как при этом условии $\text{th}(kH) \cong kH$, то получим выражение для скорости планетарной волны в приближении мелкой воды

$$c = \sqrt{\alpha\Delta T g H + \frac{(2\omega_{0z})^2}{k^2}}. \quad (75)$$

Таким образом, для возмущенной поверхности волны получим

$$\eta = A \cdot \text{ch}(kH) e^{i(k_1x + k_2y - \omega t)}, \quad \omega = \sqrt{c_0^2 k^2 + (2\omega_{0z})^2}. \quad (76)$$

Найдем скорость планетарной волны в приближении бесконечно протяженной по высоте атмосфере. В этом случае $kH \rightarrow \infty$ и $\text{th}(kH) \rightarrow 1$, поэтому получим

$$c_0 = \sqrt{\frac{g\alpha\Delta T}{k}},$$

$$c = \sqrt{\frac{g\alpha\Delta T}{k} + \frac{(2\omega_0 z)^2}{k^2}}.$$

Таким образом, мы пришли к известному результату [3], что вращение Земли приводит к появлению дисперсии у длинных гравитационных волн. Однако в отличие от результатов, приведенных в литературе для случая мелкой воды, в настоящей статье получены выражения для скорости распространения волн во вращающейся атмосфере в общем случае атмосферы конечной протяженности.

Список литературы

1. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986. Т. 1. 399 с.; Т. 2. 416 с.
2. Nappo Carmen G. An Introduction to Atmospheric Gravity Waves. – Academic Press, 2002. - An imprint of Elsevier Science, International Geophysics Series. Vol. 85.- 300 p.
3. Pedlosky J. Waves in the Ocean and Atmosphere. Introduction to wave dynamics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. 267 p.
4. Plumb R. Alan. Atmospheric and Oceanic Circulations. – Spring, 2003. 181 p.

ИСПАРИЕНИЕ ОБЛАЧНЫХ КАПЕЛЬ НА ФРОНТЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ВОЛН

М.К. Жекамухов¹, Х.М. Калов², Р.Х. Калов²

¹ - Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик

² - ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Введение

Рассеяние туманов и низких слоистых облаков необходимо для увеличения метеорологической дальности видимости в аэропортах, на морских пристанях, горнолыжных трассах, для повышения эффективности применения авиационных оптико-электронных и тепловизионных систем наведения, отличающихся повышенной чувствительностью к метеорологическим условиям.

Для рассеяния переохлажденных облачных образований используются традиционные реагенты, такие как кристаллизующие реагенты и хладореагенты. Переохлажденные туманы и низкие слоистые облака (НСО) составляют всего 5% от их общего количества, остальные 95% составляют теплые туманы и НСО. Наибольшую сложность представляет рассеяние теплых туманов и НСО. Для рассеяния последних, используются тепловые методы, основанные на повышении температуры облачной среды.

В Высокотемпературном геофизическом институте (ВГИ) разработаны тепловой метод и технические средства для их рассеяния [1]. Повышение температуры тумана осуществляется микровзрывами специальных устройств, при срабатывании которых происходит выделение энергии и образование ударных волн.

Для испытания метода и средств воздействия в ВГИ проведены натурные эксперименты, в которых использованы высококалорийные вещества – горючие композиции в двух режимах их сжигания: в режиме детонации с образованием воздушных волн сжатия, распространяющихся в облачной среде со скоростями 450+600 м·с⁻¹ и в режиме горения, при котором происходит мощное тепловое излучение (10⁴ ккал при сгорании 1 кг вещества).

При распространении ударных волн в облачной среде происходит скачкообразное повышение давления и температуры на фронте волны.

В работе приводятся результаты расчетов времени испарения облачных капель в ударной волне, возникающей при взрыве теплового заряда.

Испарение облачных капель в ударной волне

Если взрывчатое вещество представлено в виде шара, то радиус этого шара для тротила и многих других взрывчатых веществ средней мощности можно принять равным:

$$R_0 = 0.05\sqrt[3]{q}, \quad (1)$$

где R_0 - выражено в м, а q – масса заряда в кг.

Первоначальный радиус R_H расширяющихся взрывных газов связан с R_0 формулой

$$R_H = (11...12) \cdot R_0.$$

Действие взрывных газов проявляется в основном на расстояниях, не превышающих R_H .

Повышения давления и температуры вблизи центра взрыва настолько значительны, что при взрыве в облаке облачные капли, пересекающие фронт ударной волны, дробятся на более мелкие капельки и испаряются. Перепад давления ΔP в ударной волне, при котором разрушается капля радиусом r , приблизительно можно оценить на основании формулы Лапласа:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r},$$

где γ - поверхностное натяжение воды.

Таким образом, можно считать, что облачные капли, радиусы которых превосходят величину $\frac{2\gamma}{\Delta P}$, будут дробиться в ударной волне с амплитудой ΔP .

ΔP .

Возможность полного испарения облачных капель в ударной волне определяется двумя факторами – величиной избыточной температуры ΔT и длительностью сохранения состояния повышенного давления в ударной волне.

Зависимость избыточного давления ΔP в ударной волне от расстояния R до центра взрыва определяется формулой М.А. Садовского [2]:

$$P = 7 \frac{q}{R^3} \left(\frac{V}{V_T} \right) + 2.7 \frac{q^{2/3}}{R^2} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{2/3} + 0.84 \frac{q^{1/3}}{R} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где V – удельная энергия взрывчатого вещества; V_T - удельная энергия трюта; R выражено в м; q – в кг; ΔP – в атм.

Подставляя вместо q значение R_0 , определяемое формулой (1), можно записать:

$$\Delta P = 5600 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \left(\frac{V}{V_T} \right) + 1080 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \left(\frac{V}{V_T} \right)^{2/3} + 16.8 \frac{R_0}{R} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) справедливы также и для поздней стадии распространения ударных волн.

Если взрыв происходит на поверхности грунта, то волна распространяется не в полной сфере, а только в полусфере, и объем воздуха, охватываемый ударной волной, уменьшается вдвое. При этом усиление ΔP такое, которое соответствует удвоению величины заряда. Таким образом, при взрыве заряда на поверхности грунта в формуле (2) следует заменить q на $2q$. В результате получаем:

$$\Delta P = 14 \frac{q}{R^3} \left(\frac{V}{V_T} \right) + 4.3 \frac{q^{2/3}}{R^2} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{2/3} + 1.1 \frac{q^{1/3}}{R} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

При удалении от центра взрыва амплитуда ударной волны быстро уменьшается, ударная волна становится слабой. На этой стадии зависимость между ΔP и приращением ΔT выражается формулой [2]:

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{\rho_0 C_p}, \quad (5)$$

где ρ_0 - плотность невозмущенного воздуха; C_p - теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

В таблице представлены значения ΔP и ΔT на различных расстояниях R от центра взрыва и при различных значениях веса заряда q , при $\rho_0 = 1 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_p = 1 \text{ дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$ и $V = V_T$. Нижняя строка в каждой колонке относится к взрыву на поверхности грунта.

Таблица. Значения ΔP и ΔT при различных R и q .

R, м		50	100	150	200
q = 10 кг	ΔP , атм.	0,042	0,020	0,012	0,009
		0,057	0,026	0,017	0,012
	ΔT , °C	4,20	2,0	1,2	0,9
		5,70	2,6	1,7	1,2
q = 50 кг	ΔP , атм.	0,078	0,040	0,021	0,018
		0,110	0,047	0,027	0,020
	ΔT , °C	7,8	4,0	2,1	1,8
		11,0	4,7	2,7	2,0
q = 100 кг	ΔP , атм.	0,107	0,046	0,030	0,020
		0,150	0,062	0,038	0,034

Из данных таблицы видно, что при мощных взрывах на расстояниях порядка 150...200 метров от места взрыва температура на фронте ударной волны еще заметно отличается от температуры невозмущенного воздуха.

Если проследить за изменением во времени давления P на определенном расстоянии от центра взрыва, то получается картина, изображенная на рис.1.

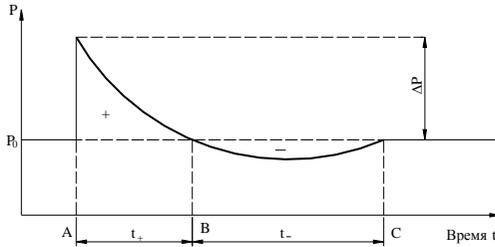


Рис. 1. Зависимость давления P от времени t на фронте сравнительно слабой ударной волны. P_0 – давление в невозмущенном воздухе, ΔP – перепад давления в ударной волне, AB – область сжатия (t_+), BC – область разрежения (t_-).

Падение давления ΔP происходит практически по прямолинейному графику. Длительная некоторая зона сжатия (отрезок AB) сменяется более продолжительной зоной разрежения (отрезок BC).

Воздух, через который проходит ударная волна, движется в зоне сжатия в ту же сторону, что и волна, а в зоне разрежения – в противоположную.

Скорость движения воздуха непосредственно за фронтом ударной волны равна:

$$v_{\Phi} = D_y \frac{\Delta P}{P_0}, \quad (6)$$

где D_y – скорость ударной волны, определяемая формулой [2]:

$$D_y = C \sqrt{1 + 0.83 \frac{\Delta P}{P_0}}, \quad (7)$$

где C – скорость звука в воздухе; P_0 – давление в невозмущенном воздухе.

При $\Delta P \approx 0,04$ атм. из формул (6) и (7) получаем: $D_y \approx 336,4 \text{ мс}^{-1}$, $v_{\Phi} \approx 10 \text{ мс}^{-1}$ (при $C = 331 \text{ мс}^{-1}$). Таким образом, скорость массового потока за фронтом слабой ударной волны составляет величину порядка 10 мс^{-1} .

Облачные капли, пересекающие фронт ударной волны, захватываются и увлекаются спутным потоком воздуха, возникающим за ударной волной. В силу малости числа Стокса можно считать, что движение этих капель происходит под действием стоксовой силы:

$$\vec{F}_{СТ} = 6\pi\eta\vec{v}_r,$$

где η – динамический коэффициент вязкости воздуха; v_r – скорость капель относительно потока воздуха: $v_r = v_{\Phi} - v$, где v – абсолютная скорость движения облачной капли.

Уравнение движения капли можно записать в виде

$$m \frac{dv}{dt} = 6\pi\eta r(v_\phi - v),$$

где m – масса капли. Из этого уравнения получаем

$$\frac{dv}{dt} = \frac{9\nu}{2\rho_k r^2}(v_\phi - v), \quad (8)$$

где ν – вязкость воздуха; ρ_k – плотность воды.

Решение уравнения (8), удовлетворяющее начальному условию $v(0)=0$, имеет вид:

$$v = v_\phi \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \quad (9)$$

где $\tau = \frac{\rho_k r^2}{9\nu\rho}$. Отсюда при $r = 10$ мкм получаем $\tau = 5,6 \cdot 10^{-4}$ с, а при $r = 1$ мкм

$$\tau = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

С другой стороны, на основе опытов и теоретических расчетов установлено, что в слабой ударной волне время действия положительного давления в ударной волне t_+ (участок АВ на рис.1) связано с весом заряда q и с расстоянием R формулы [2]:

$$t_+ = \alpha \sqrt{R} \cdot \sqrt[3]{q}, \quad (10)$$

где $\alpha = 0,0015 \left(\frac{v}{v_T}\right)^{1/6}$; R выражено в м; q – в кг; t – в сек.

При $R = 50$ м, $q = 10$ кг и $v = v_T$ получаем: $t_+ \approx 1,56 \cdot 10^{-2}$ с. В этом случае в формуле (9) отношение $\frac{t}{\tau} \ll 1$ и $v \approx v_\phi$.

Из этих оценок следует, что облачные капли, попадающие в спутный поток воздуха за фронтом ударной волны, практически мгновенно увлекаются этим потоком, как в зоне сжатия, так и в зоне разрежения. Поэтому процессами взаимной коагуляции этих капель вследствие различия скоростей их движения практически можно пренебречь.

Более существенным является процесс испарения облачных капель за фронтом ударной волны. Если в зоне сжатия газа температуру принять в среднем постоянной, то формулу, описывающую закон изменения радиуса капли, можно записать в виде:

$$r^2 = r_0^2 - \frac{2D\Delta\rho_n}{\rho_k} t, \quad (11)$$

где r_0 – начальный радиус капли; D – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе; ρ_k – плотность воды; $\Delta\rho_n$ – разность плотностей пара на поверхности капли и вдали от нее.

Исходя из уравнения Клайперона-Клаузиуса, можно записать:

$$\Delta\rho \cong \frac{\rho_n(T_0)L\Delta T}{R_n T_0^2} = \frac{\rho_n(T_0)L\Delta P}{\rho_0 C_p R_n T_0^2}.$$

Здесь T_0 - абсолютная температура воздуха в невозмущенном воздухе; $\rho_n(T_0)$ - насыщающая плотность пара при температуре T_0 ; L – удельная теплота испарения воды; R_n - газовая постоянная водяного пара; ΔP определяется формулой (4).

Расчеты показывают, что на расстояниях R порядка 30 м и выше основной вклад в формулу (2) вносит последнее слагаемое, т.е.:

$$\Delta P = \frac{\beta q^{\frac{2}{3}}}{R},$$

где $\beta = 0.84 \left(\frac{v}{v_T} \right)^{\frac{1}{3}}$. При этом формула (11) принимает вид:

$$r^2 = r_0^2 - \frac{2D\rho_n(T_0)\beta Lq^{\frac{1}{3}}}{\rho_k \rho_0 C_p R_n T_0^2 R} t, \quad (12)$$

Полагая в формуле (12) $r = 0$, найдем время t полного испарения капли:

$$\tau = \frac{\rho_k \rho_0 C_p R_n T_0^2 r_0^2 R}{2\beta \rho_n(T_0) L q^{\frac{1}{3}} D}. \quad (13)$$

Полное испарение каплей имеет место в том случае, когда время t_+ , в течение которого в ударной волне сохраняется перегрев воздуха, больше чем время τ . Таким образом, условие полного испарения капли можно записать в виде:

$$\frac{\rho_k \rho_0 C_p R_n T_0^2 r_0^2 R}{2\beta \rho_n(T_0) L q^{\frac{1}{3}} D} \leq \alpha \sqrt{R} \cdot \sqrt[3]{q}. \quad (14)$$

Если же взрыв заряда происходит на поверхности грунта, то в формуле (14) нужно заменить q на $2q$, β на $\sqrt[3]{2}\beta$ и α на $\alpha\sqrt[3]{2}$. При этом вместо выражения $(\alpha\beta)^2$ получаем $2(\alpha\beta)^2$ и в формуле (14) появляется дополнительный множитель 4, т.е. мы имеем:

$$R_s = 4R.$$

Большой интерес представляет также случай, когда заряд взрывается на некоторой высоте h порядка нескольких метров от поверхности земли. В этом случае по облачной среде будут распространяться одна за другой две ударные волны – прямая и отраженная, разделенные промежутком времени $\Delta t = \frac{2h}{D_y}$. При этом для слабых ударных волн избыточное давление на фрон-

те отраженной ударной волны примерно в два раза превосходит избыточное давление в прямой ударной волне. При этом коэффициент увеличивается в 2 раза. Кроме того, промежутки времени t_{1+} и t_{2+} , в течение которых сохраняются избыточные давления в прямой и отраженной ударных волнах, складываются, т.е. коэффициент α в формуле (14) примерно удваивается.

Таким образом, в рассматриваемом случае в формуле (14) появляется дополнительный множитель 16, т.е. $R_3 = 16 R_1$.

Запишем теперь характерные значения параметров, входящих в формулу (14): $T_0 = 280^\circ \text{K}$; $\rho_0 = 1,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; $\rho_n(T_0) = 7,8\cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; $D = 2\cdot 10^{-3} \text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1}$; $C_p = 10^3 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$; $L = 2,5\cdot 10^6 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$; $R_n = 0,47\cdot 10^3 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$; $\alpha = 1,5\cdot 10^{-3} \text{ с}\cdot\text{м}^{-1/2}\cdot\text{кг}^{-1/6}$; $\beta = 0,84\cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{кг}^{-1/3}$; $r_0 = 10^{-6} \bar{r}_0$, где \bar{r}_0 - средний радиус облачных капель в мкм.

При этих значениях параметров формула (14) принимает вид:

$$R_1 = \frac{5}{\bar{r}_0^4} q \left(\frac{v}{v_T} \right), \quad (15)$$

где R_1 выражено в м, q – в кг, \bar{r}_0 - в мкм.

При $q = 10 \text{ кг}$, $v = v_T$ и $\bar{r}_0 = 1 \text{ мкм}$ по формуле (15) получаем: $R_1 = 50 \text{ м}$,

$R_2 = 200 \text{ м}$, $R_3 = 800 \text{ м}$, а при $\bar{r}_0 = 2 \text{ мкм}$: $R_1 = 3,1 \text{ м}$, $R_2 = 12,5 \text{ м}$, $R_3 = 50 \text{ м}$

Эти оценки показывают, что в слабой ударной волне в основном испаряются мелкие облачные капли с радиусами порядка 1 мкм.

Заключение

Распространение ударных волн в облачной среде приводит к созданию зоны просветления (увеличению метеорологической дальности видимости) вследствие испарения облачных капель под действием повышения температуры и давления на волне сжатия по сравнению с их значениями в невозмущенном воздухе. При мощных взрывах (см. таблицу) на расстояниях 100÷200 м от места взрыва температура на фронте ударной волны еще существенно отличается от температуры в невозмущенной среде (на 6,2 и 3,2 °С соответственно). При слабых взрывах ($q = 10 \text{ кг}$) на поверхности земли испарение капель тумана происходит в объеме сферы радиусом до 50 м. А если взрыв производить на высоте 1÷2 м от поверхности земли, то эффект усиливается и при этом существенное уменьшение влажности тумана и образование просветления в облачном образовании происходит в радиусе 100 и более метров.

Список литературы

1. Калов Х.М., Калов Р.Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозоградовые облака и туманы. – Нальчик: Изд. М. и В. Котляровых (ООО «Полиграфсервис и Т»), 2010. 220 с.
2. Покровский Г.И. Взрыв. – М.: Недра, 1967. 411 с.
3. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. 687 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСАДКОВ И ОБЛАЧНЫХ ЧАСТИЦ НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Л.Т. Созаева¹, М.М. Жангоразова²

¹ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

²ФГБУ «ВФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик

Радиолокационное обнаружение облаков и осадков связано с исследованием рассеяния радиоволн гидрометеорами (капли, град, кристаллы, снежинки и др.). Особый интерес представляет исследование характеристик рассеяния на дождевых каплях в осадках. В условиях свободного падения капли принимают сложную форму, которая однозначно определяется их массой или эквивалентным диаметром, т.е. диаметром сферической капли, имеющей ту же массу. Капли диаметром менее 280 мкм можно рассматривать как сферические частицы. Капли диаметром более 280 мкм приобретают форму сплюснутого эллипсоида вращения [7,9]. У капель диаметром более 1мм нижняя часть начинает прогибаться внутрь, и чем больше диаметр капель, тем больше прогибается основание. Начиная, с диаметра 6 мм и более капля становится неустойчивой и начинает распадаться.

По результатам лабораторных исследований среднее значение фактора формы капель (отношение вертикального размера к горизонтальному) в зависимости от эквивалентного диаметра определяется по формуле:

$$\frac{a}{b} = 1,012 - 0,144 \cdot D - 1,03 \cdot D^2, \quad (1)$$

где a – максимальная ось; b – минимальная полуось сфероида; D – эквивалентный диаметр [8,6,10].

Рассеяние электромагнитной волны несферическими частицами исследуется с помощью метода разделения переменных (Separation of Variables Method, SVM) [4]. Согласно методу, вводится сфероидальная система координат (ξ, η, φ) таким образом, что начало координат совпадает с центром сфероида. Большая полуось сфероида обозначена через a , а малая полуось – b . Параметр $\tilde{f}=1$ для вытянутых сфероидальных координат, при этом $\xi \in [1, \infty)$, $\eta \in [-1, 1]$, $\varphi \in [0, 2\pi)$ и $\tilde{f} = -1$ для сплюснутых сфероидальных координат, при этом $\xi \in [0, \infty)$. Координатными поверхностями в сфероидальной системе координат являются вытянутые или сплюснутые сфероиды. Отметим, что вытянутые сфероидальные координаты возникают при вращении вокруг большой оси эллипсов, а сплюснутые – при вращении вокруг малой оси.

Предполагается, что на частицу падает плоская поляризованная волна под углом α к оси вращения частицы, которая может быть представлена в виде суперпозиции волн двух типов (ТЕ и ТМ моды), для которых электрический и магнитный вектора, соответственно, вибрируют перпендикулярно плоскости падения. Плоскость падения излучения определяется как плоскость, которая проходит через ось x и z (ось симметрии частицы) и является плоскостью отсчета для падающей волны, т.е. волновой вектор \vec{k} лежит в плоскости xz . Аналогично вводится плоскость рассеяния, проходящая через ось z в направлении распространения рассеянного излучения. Связь падающего и рассеянного излучения определяется амплитудной матрицей рассеяния, по которой определяются все характеристики рассеянного излучения. Ниже приводятся выражения для поперечника обратного рассеяния, которое определяется интенсивностью излучения, рассеянного назад [4, 11].

Для ТМ моды:

$$Q_{bk} = \frac{4}{c^2 [(\xi_0^2 - \tilde{f})(\xi_0^2 - \tilde{f} \cos^2 \alpha)]^{1/2}} \cdot \left| \sum_{l=1}^{\infty} i^{(l+1)} b_l^{(1)} S_{ll}(c, \cos \alpha) - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} i^{(l-1)} (k_1 a_{ml}^{(1)} S_{ml}(c, \cos \alpha) - i b_{ml}^{(1)} S'_{ml}(c, \cos \alpha)) \sin \alpha \right|^2, \quad (2)$$

для ТЕ моды:

$$Q_{bk} = \frac{4}{c^2 [(\xi_0^2 - \tilde{f})(\xi_0^2 - \tilde{f} \cos^2 \alpha)]^{1/2}} \cdot \left| \sum_{l=1}^{\infty} i^{(l+1)} a_l^{(1)} S_{ll}(c, \cos \alpha) - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} i^{(l-1)} (k_1 a_{ml}^{(1)} S_{ml}(c, \cos \alpha) - i b_{ml}^{(1)} S'_{ml}(c, \cos \alpha)) \sin \alpha \right|^2, \quad (3)$$

где $c_i = k_i \frac{d}{2}$, $S_{ml}(c_i, \eta)$ – вытянутые угловые сфероидальные функции с нормировочным множителем $N_{ml}(c_i)$; $\bar{S}_{ml}(c_i, \eta) = N^{-1}_{ml}(c_i)S_{ml}(c_i, \eta)$ – вытянутые угловые сфероидальные функции; $R_{ml}^{(1),(3)}(c_i, \xi)$ – вытянутые радиальные сфероидальные функции первого и третьего порядка; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; λ – длина волны.

Для наклонного падения $\alpha \neq 0$ мы должны рассмотреть два случая поляризации (ТЕ и ТМ моды) отдельно. Для параллельного падения к оси вращения $\alpha = 0$, обе поляризации дают идентичные результаты в силу симметрии относительно падающей волны. При $\alpha = 0$ выражения (3) и (4) принимают вид:

$$Q_{bk} = \frac{4}{c^2 \left[(\xi_0^2 - \tilde{f}) \right]^{1/2}} \left| \sum_{l=1}^{\infty} i^{(l)} b_l^{(1)} d_r^1(c) \frac{(r+1)(r+2)}{2} \right|^2. \quad (4)$$

Фактор обратного рассеяния равен:

$$Q_{bk} = C_{bk} / G(\alpha), \quad (5)$$

где C_{bk} – поперечник обратного рассеяния; $G(\alpha) = \pi b(a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha)^{1/2}$ – геометрическое сечение рассеяния в случае вытянутого сфероида и $G(\alpha) = \pi a(a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha)^{1/2}$ в случае сплюсченного сфероида.

Нормализованный поперечник обратного рассеяния:

$$C_{bk} / \pi r^2, \quad (6)$$

где πr^2 – геометрическое сечение рассеяния в случае сферы.

Для сферических частиц выражение для поперечников обратного рассеяния имеет вид:

$$\sigma(r, \lambda) = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1)(a_n - b_n) \right|^2, \quad (7)$$

где коэффициенты a_n и b_n являются амплитудами парциальных волн, индуцированными магнитными и электрическими диполями, квадрупольями и т.д. [1,2,3,5].

Для вычисления этих коэффициентов используются следующие формулы Ми:

$$a_n = \frac{\phi'_n(y)\phi_n(\rho) - m\phi_n(y)\phi'_n(\rho)}{\phi'_n(y)\xi_n(\rho) - m\phi_n(y)\xi'_n(\rho)}, \quad b_n = \frac{m\phi'_n(y)\phi_n(\rho) - \phi_n(y)\phi'_n(\rho)}{m\phi'_n(y)\xi'_n(\rho) - \phi_n(y)\xi_n(\rho)},$$

где $\rho = \frac{2\pi r}{\lambda}$ параметр Ми;

$m = n - i\chi$ - относительный комплексный показатель преломления;

$\phi_n(\rho)$ - цилиндрические функции Бесселя первого рода для решения

внутри сферы;

$\xi_n(\rho)$ - цилиндрические функции Ханкеля второго рода для решения вне сферы.

Нами были проведены расчеты поперечников обратного рассеяния для дождевых капель сферической формы и формы сплющенного сфероида. Расчеты проводились для нижней части облака, где преобладают температуры 10^0C , и на длинах волн 3,2 и 10 см для капель диаметром от 0,1 до 8 мм. Предварительный сравнительный анализ поперечников обратного рассеяния для сфероидальных дождевых капель сфероида с отношением осей 1,01 и сферических равновеликих капель (по Ми) показал хороший результат. Далее провели расчеты с учетом фактора формы согласно формуле (1). На рис.1 представлены результаты расчетов проведенных по формулам (2),(3),(6). На рис.2 представлены результаты расчетов проведенных по формулам (2),(3),(5).

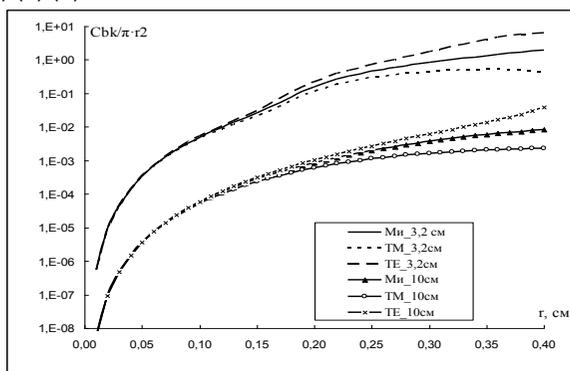


Рис.1. Нормализованные поперечники обратного рассеяния для дождевых капель на дине волны $\lambda=3,2$ см и 10 см.

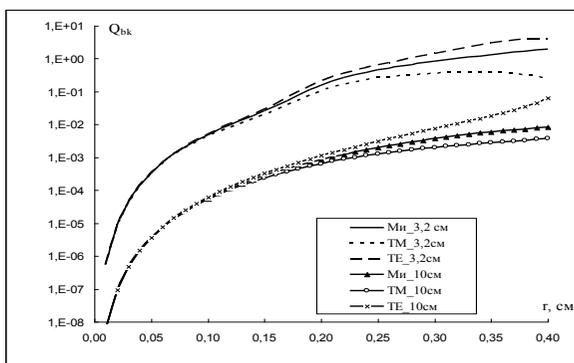


Рис.2. Факторы обратного рассеяния для дождевых капель на длине волны $\lambda=3,2$ см и 10 см.

На рисунках нанесены для сравнения характеристики обратного рассеяния для сферических капель (по Ми).

Из рисунков 1,2 видно, что характеристики обратного рассеяния зависят от фактора формы. Начиная с радиуса 0,07-0,1 см проявляется влияние формы на поляризационные характеристики обратного рассеяния. Следует отметить, что чем больше размер капли (тем больше фактор формы), тем больше разница между поперечниками обратного рассеяния вертикальной (ТМ – моды) и горизонтальной (ТЕ – моды) поляризации.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы при решении прямой и обратной задач радиолокации.

Список литературы

1. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986.-660 с.
2. Ван-де-Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. – М.: Изд. Иностран. Лит., 1961.-536 с.
3. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами.- М.: Мир, 1971.-165 с.
4. Фарафонов В.Г. Рассеяние света осесимметричными частицами: единый подход с использованием сфероидальных функций//Санкт-Петербург, Записки научных семинаров ПОМИ. 2010. Т.380. С.132-178.
5. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде.- Л.: ГИИТЛ, 1951. 288с.

6. Beard K.V., Tokay A. A field study of raindrop oscillations: Observations of size spectra and evaluation of oscillation causes//Geophys. Res. Lett. 1991. N. 18. - P. 2257-2260.
7. Blanchard D.C. The behavior of water drops at terminal velocity in air//Trans. Amer. Geophys. Union. 1950. Vol.31. P.836.
8. Chandrasekar V., Cooper W.A., Bringi V.N. Axis ratios and oscillation of raindrops//J. Atmos. Sci. 1988. N. 45. - P. 1323-1333.
9. Gunn R. Mechanical resonance in freely falling raindrops//J. Geophys. Res. 1949. Vol.54. P.383.
10. Kubesh R.J., Beard K.V.. Laboratory measurement of spontaneous oscillations for moderate-size raindrops//J. Atmos. Sci. 1993. N. 50. P.1089-1098.
11. Farafonov V.G., Application of non-orthogonal bases in the theory of light scattering by spheroidal particles//Light Scattering Reviews (ed, Kokhanovsky A,A,) - Springer-Praxis. 2013. N. 8. P.189-268.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА В РАЗВИВАЮЩЕМСЯ КОНВЕКТИВНОМ ОБЛАКЕ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ И САНТИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН

Х.М. Жакамихов

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Введение

Состояние поляризации потока электромагнитного излучения полностью описывается четырьмя параметрами Стокса, полученными либо экспериментально, либо теоретически, путем определения элементов матрицы преобразования. С этой целью будем исследовать зависимости этих параметров от угла рассеяния, спектра облачных капель и длины волны в развивающемся конвективном облаке от его основания до уровня конвекции. В литературе имеется много работ, посвященных оптическим характеристикам частиц как у нас в стране, так и за ее рубежом. В частности, исследованы эти характеристики для отдельных однослойных и двухслойных частиц [1,2,7,13,14], а также для фиксированных спектров частиц [4,5,10,12]. Проведены численные исследования индикатрисы рассеяния, линейной поляризации и фактора деполяризации спектра градовых частиц с учетом водяной

пленки на их поверхностях и без нее [6]. Однако работ по численному исследованию оптических характеристик, в частности, поляризации через параметры Стокса с переменным спектром облачных капель, очень мало. В связи с этим очень важно проведение численного исследования параметров Стокса в развивающемся конвективном облаке от его основания до уровня конвекции для конкретной стратификации атмосферы.

Постановка задачи

Для проведения численного исследования зависимости между состоянием поляризации рассеянного излучения в облаке и параметрами Стокса приведем их выражения [2,4]:

$$\begin{aligned} I &= E_1 E_1^* + E_2 E_2^*, \\ Q &= E_1 E_1^* - E_2 E_2^*, \\ U &= E_1 E_2^* + E_2 E_1^*, \\ V &= i(E_1 E_2^* - E_2 E_1^*), \end{aligned} \quad (1)$$

где E_1 и E_2 - комплексные осциллирующие функции, звездочка обозначает комплексно сопряженную величину, индексы 1 и 2 относятся к случаям, когда электрический вектор соответственно перпендикулярен и параллелен плоскости рассеяния.

Первый параметр I представляет собой интенсивность, т.е. поток энергии через единицу площади. Другие параметры имеют ту же размерность. Для удобства проведения расчетов параметры Стокса (1) преобразовывают [2,3,4] к удобному виду

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2, \\ Q &= I \cos 2\beta \cos 2\chi, \\ U &= I \cos 2\beta \sin 2\chi, \\ V &= I \sin 2\beta, \end{aligned} \quad (2)$$

где I_1 и I_2 - рассеянные интенсивности для падающего света, поляризованного перпендикулярно и параллельно плоскости рассеяния, χ и β - параметры поляризации: χ - угол, образованный осями эллипса поляризации с осями системы координат; β - угол, определяемый отношением малой оси эллипса поляризации к большой оси. Ориентация эллипса дается углом χ , $-\pi/2 \leq \chi \leq \pi/2$. Эллиптичность - величиной $\tan \beta$, $-\pi/4 \leq \beta \leq \pi/4$. Эти параметры являются вещественными числами, удовлетворяющими соотношению

$$I^2 \geq Q^2 + U^2 + V^2. \quad (3)$$

Равенство имеет место в случае поляризованного света, при $Q = U = V = 0$

свет не поляризован (естественный свет), при $I^2 > Q^2 + U^2 + V^2$ свет частично поляризован. Тогда степень линейной, круговой и общей (эллиптической) поляризации рассчитывают [2] по выражениям: $(Q^2 + U^2)^{1/2}/I$, V/I , $(Q^2 + U^2 + V^2)^{1/2}/I$.

Как видно из равенств (2) все параметры выражаются через первый I , а первый есть сумма двух первых элементов матрицы Стокса, приведем их в случае полидисперсных систем однородных частиц [4]:

$$P_i(\vartheta, m, \rho_i) = \frac{N\lambda^2}{\pi\beta_{\text{pac}}(n_i(r_i), m, \rho_i)} \int_{r_1}^{r_2} f(r_i) i_j(\vartheta, m, \rho_i) dr_i, \quad (4)$$

где $\rho_i = 2\pi r_i/\lambda$ - параметр рассеяния, m - комплексный показатель, λ - длина волны, ϑ - угол рассеяния, r_i - радиусы частиц, N - концентрация частиц, n_i - концентрация частиц каждой градации. Тогда слагаемые первого параметра в (2) равны $I_1 = P_1(\vartheta, m, \rho_i)$, $I_2 = P_2(\vartheta, m, \rho_i)$.

В случае дисперсной среды и однослойных частиц объемный коэффициент рассеяния записывается в виде

$$\beta_{\text{pac}}(n_i(r_i), m, \rho_i) = \pi N \int_{r_1}^{r_2} f(r_i) K_{\text{pac}}(m, \rho_i) r_i^2 dr_i, \quad (5)$$

где $K_{\text{pac}}(m, \rho_i)$ - фактор эффективности рассеяния отдельной частицы, который имеет вид:

$$K_{\text{pac}}(m, \rho_i) = \frac{\lambda^2}{2\pi^2 r_i^2} \sum_{n=1}^{n=N} (2n+1) \left(|a_n(m, \rho_i)|^2 + |b_n(m, \rho_i)|^2 \right), \quad (6)$$

где $a_n(m, \rho_i)$ и $b_n(m, \rho_i)$ - комплексные амплитудные коэффициенты. В случае однофазных частиц они принимают вид [3]:

$$\begin{aligned} a_n(m, \rho_i) &= \frac{\psi_n'(m, \rho_i) \psi_n(\rho_i) - m \psi_n(m, \rho_i) \psi_n'(\rho_i)}{\psi_n'(m, \rho_i) \xi_n(\rho_i) - m \psi_n(m, \rho_i) \xi_n'(\rho_i)}, \\ b_n(m, \rho_i) &= \frac{m \psi_n'(m, \rho_i) \psi_n(\rho_i) - \psi_n(m, \rho_i) \psi_n'(\rho_i)}{m \psi_n'(m, \rho_i) \xi_n(\rho_i) - \psi_n(m, \rho_i) \xi_n'(\rho_i)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\psi_n(\rho_i)$, $\xi_n(\rho_i)$ и $\psi_n(m, \rho_i)$ - функции Риккати-Бесселя с действительными и комплексными переменными, а со штрихами - их производные.

Элементы нормированной матрицы рассеяния Стокса для отдельных частиц выражаются через безразмерные комплексные амплитуды рассеянного излучения $S_j(\vartheta, m, \rho_i)$ ($j = 1, 2$) выражениями

$$i_1(\vartheta, m, \rho_i) = |S_1(\vartheta, m, \rho_i)|^2,$$

$$i_2(\vartheta, m, \rho_i) = |S_2(\vartheta, m, \rho_i)|^2. \quad (8)$$

Для амплитуд рассеянного излучения решение Ми можно записать в симметричной форме:

$$S_1(\vartheta, m, \rho_i) = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n(m, \rho_i)\pi_n(\mu) + b_n(m, \rho_i)\tau_n(\mu)],$$

$$S_2(\vartheta, m, \rho_i) = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n(m, \rho_i)\tau_n(\mu) + b_n(m, \rho_i)\pi_n(\mu)], \quad (9)$$

где $\mu = \cos\vartheta$.

Функции угла рассеяния $\pi_n(\mu)$ и $\tau_n(\mu)$ определены через производные от полиномов Лагранжа целого порядка и вещественного аргумента:

$$\pi_n(\mu) = \frac{d}{d\mu} P_n(\mu),$$

$$\tau_n(\mu) = \mu\pi_n(\mu) - (1 - \mu^2) \frac{d}{d\mu} \pi_n(\mu), \quad (-1 \leq \mu \leq 1), \quad (10)$$

где $P_n(\mu) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{d\mu^n} (\mu^n - 1)^n$.

Используя хорошо известные рекуррентные соотношения между этими полиномами и их производными, можно найти коэффициенты $\pi_n(\mu)$ и $\tau_n(\mu)$.

Начальный спектр размеров капель описывается обобщенным гамма - распределением [4]:

$$n_i(r_i) = Nf(r_i) = Ar_i^\alpha \exp(-Br_i^\gamma), \quad (11)$$

где $f(r_i)$ - функция распределения размеров капель, А и В - константы. Константа В определяется модальным размером капель r_m из соотношения $B = \frac{\alpha}{\gamma r_m^\gamma}$ при условии, что значения параметров α и γ фиксированы. Константы

А и В связаны между собой соотношением

$$A = \frac{\gamma N B^{\frac{\alpha+1}{\gamma}}}{\Gamma\left(\frac{\alpha+1}{\gamma}\right)}. \quad (12)$$

Здесь для функции распределения размеров капель в облаке, мы брали $\alpha = 2$, $\gamma = 1$, $r_m = 3$ мкм, $N = 400 \text{ см}^{-3}$.

Расчеты и обсуждение результатов

Для проведения расчетов будем исходить из уравнений струйной модели облачной конвекции, рассмотренной в [8,9]. Эта модель одномерная, стационарная с подробным учетом микрофизики и со сдвигом ветра по высоте. Ею можно пользоваться для расчета параметров облака для различных целей. В данном случае пользуемся для исследования параметров Стокса при изменениях спектра облачных капель в развивающемся конвективном облаке с высотой. При этом переходим в теории Ми от интегрирования к суммированию, поскольку этого требует дискретность распределения капель в струйной модели конвективного облака.

Для проведения расчетов по модели берем тридцать градаций облачных капель от 1 до 30 мкм и проследим за их изменением и изменениями параметров Стокса в ходе развития облачной конвекции. Так как исследование этих параметров рассматриваем в жидкой части облака, то расчеты по модели проведены до высоты 5км (-10°C) для миллиметровых и сантиметровых радиоволн 0,1; 0,5; 1; 5; 10см. Расчеты проведены для конкретной стратификации атмосферы по алгоритмам [4,11] и результаты находятся в хорошем совпадении. В параметрах Стокса (2) для проведения исследования вместо параметров поляризации χ и β можно поставить любые из указанных выше значений. Расчеты проведены для различных комбинаций параметров поляризации. При этом получают различные значения для параметров Стокса. Здесь приводим только результаты расчетов в таблицах и на рисунках при $\chi = \beta = \pi/6$. Кроме того, приводим полную поляризацию для некоторых параметров χ и β . В частности, при $\chi = \beta = \pm \pi/6$ имеем эллиптическую (правостороннюю и левостороннюю), при $\chi = \beta = 0$ - линейную вертикальную, а при χ - любом значении и $\beta = \pm \pi/4$ - круговую (правую и левую).

В таблицах 1,2,3 даны изменения параметров Стокса в развивающемся конвективном облаке с изменением угла рассеяния и длины волны на высотах 1км, 3км, 5км.

Таблица 1

ϑ°	$\Lambda=0,1 \text{ см}$				$\Lambda=10 \text{ см}$			
	I	Q	U	V	I	Q	U	V
0	3,026	0,755	1,308	2,615	3	0,75	1,299	2,598
5	3,015	0,752	1,303	2,605	2,989	0,747	1,294	2,588
10	2,972	0,744	1,288	2,576	2,955	0,739	1,279	2,559

15	2,926	0,73	1,264	2,527	2,9	0,725	1,256	2,511
20	2,847	0,711	1,231	2,462	2,825	0,706	1,223	2,446
25	2,754	0,687	1,19	2,381	2,732	0,683	1,183	2,366
30	2,648	0,66	1,144	2,287	2,625	0,656	1,137	2,273
35	2,528	0,63	1,092	2,184	2,507	0,627	1,085	2,171
40	2,395	0,598	1,037	2,073	2,38	0,595	1,031	2,061
45	2,262	0,566	0,98	1,959	2,25	0,563	0,974	1,949
50	2,137	0,533	0,923	1,845	2,12	0,53	0,918	1,836
55	2,004	0,501	0,867	1,734	1,993	0,498	0,863	1,726
60	1,883	0,471	0,815	1,631	1,875	0,469	0,812	1,624
65	1,776	0,444	0,768	1,537	1,768	0,442	0,766	1,531
70	1,682	0,42	0,728	1,455	1,675	0,419	0,726	1,451
75	1,605	0,401	0,695	1,389	1,6	0,4	0,693	1,386
80	1,553	0,387	0,67	1,34	1,545	0,386	0,669	1,338
85	1,514	0,378	0,655	1,31	1,511	0,378	0,654	1,309
90	1,507	0,375	0,65	1,299	1,5	0,375	0,65	1,299
95	1,516	0,378	0,654	1,308	1,511	0,378	0,654	1,309
100	1,545	0,386	0,668	1,336	1,545	0,386	0,669	1,338
105	1,607	0,399	0,691	1,383	1,6	0,4	0,693	1,386
110	1,673	0,418	0,723	1,446	1,675	0,419	0,726	1,451
115	1,764	0,44	0,763	1,525	1,768	0,442	0,766	1,531
120	1,873	0,467	0,808	1,617	1,875	0,469	0,812	1,624
125	1,982	0,496	0,859	1,718	1,993	0,498	0,863	1,726
130	2,115	0,527	0,913	1,826	2,12	0,53	0,918	1,836
135	2,243	0,559	0,969	1,938	2,25	0,563	0,974	1,949
140	2,372	0,592	1,025	2,05	2,38	0,595	1,031	2,061
145	2,491	0,683	1,079	2,158	2,507	0,627	1,085	2,171
150	2,615	0,652	1,13	2,26	2,625	0,656	1,137	2,273
155	2,707	0,679	1,176	2,351	2,732	0,683	1,183	2,366
160	2,814	0,702	1,215	2,431	2,825	0,706	1,223	2,446
165	2,883	0,72	1,247	2,495	2,9	0,725	1,256	2,511
170	2,936	0,734	1,271	2,542	2,955	0,739	1,279	2,559
175	2,975	0,742	1,286	2,571	2,989	0,747	1,294	2,588
180	2,984	0,745	1,291	2,581	3	0,75	1,299	2,598

Таблица 2

ϑ°	$\Lambda=0,1 \text{ см}$				$\Lambda=10 \text{ см}$			
	I	Q	U	V	I	Q	U	V
0	10,037	2,509	4,346	8,692	3,02	0,755	1,308	2,616
5	9,858	2,465	4,269	8,537	3,009	0,752	1,303	2,606
10	9,352	2,338	4,049	8,099	2,975	0,744	1,288	2,576
15	8,593	2,148	3,721	7,442	2,919	0,73	1,264	2,528
20	7,687	1,922	3,328	6,657	2,844	0,711	1,231	2,463
25	6,736	1,684	2,917	5,833	2,75	0,688	1,191	2,382
30	5,823	1,456	2,521	5,043	2,642	0,661	1,144	2,288
35	4,999	1,25	2,165	4,329	2,523	0,631	1,092	2,185
40	4,286	1,072	1,856	3,712	2,396	0,599	1,037	2,075
45	3,682	0,92	1,594	3,188	2,264	0,566	0,98	1,961
50	3,174	0,793	1,374	2,748	2,133	0,533	0,923	1,847
55	2,747	0,687	1,189	2,379	2,005	0,501	0,868	1,736
60	2,387	0,597	1,034	2,067	1,885	0,471	0,816	1,632
65	2,084	0,521	0,902	1,805	1,776	0,444	0,769	1,538
70	1,829	0,457	0,792	1,584	1,682	0,421	0,728	1,457
75	1,614	0,404	0,699	1,398	1,606	0,401	0,695	1,39
80	1,435	0,359	0,621	1,242	1,549	0,387	0,671	1,341
85	1,284	0,321	0,556	1,112	1,513	0,378	0,655	1,31
90	1,157	0,289	0,501	1,002	1,5	0,375	0,65	1,299
95	1,051	0,263	0,455	0,911	1,51	0,377	0,654	1,307
100	0,963	0,241	0,417	0,834	1,542	0,385	0,668	1,335
105	0,89	0,223	0,385	0,771	1,595	0,399	0,691	1,382
110	0,83	0,208	0,36	0,719	1,669	0,417	0,721	1,445
115	0,782	0,195	0,339	0,677	1,76	0,44	0,762	1,524
120	0,744	0,186	0,322	0,644	1,865	0,466	0,808	1,615
125	0,715	0,179	0,31	0,619	1,982	0,496	0,858	1,717
130	0,695	0,174	0,301	0,602	2,107	0,527	0,912	1,825
135	0,682	0,171	0,295	0,591	2,236	0,559	0,968	1,936

140	0,677	0,169	0,293	0,587	2,365	0,591	1,024	2,048
145	0,679	0,17	0,294	0,588	2,49	0,623	1,078	2,156
150	0,686	0,172	0,297	0,594	2,608	0,652	1,129	2,258
155	0,697	0,174	0,302	0,604	2,714	0,678	1,175	2,35
160	0,711	0,178	0,308	0,616	2,806	0,701	1,215	2,43
165	0,725	0,181	0,314	0,627	2,88	0,72	1,247	2,494
170	0,736	0,184	0,319	0,638	2,935	0,734	1,271	2,542
175	0,744	0,186	0,322	0,644	2,968	0,742	1,285	2,571
180	0,747	0,187	0,323	0,647	2,98	0,745	1,29	2,581

Таблица 3

ϑ°	$\Lambda=0,1 \text{ см}$				$\Lambda=10 \text{ см}$			
	I	Q	U	V	I	Q	U	V
0	101,6	25,4	43,994	87,988	3,268	0,817	1,415	2,83
5	87,674	21,918	37,964	75,928	3,256	0,814	1,41	2,82
10	55,947	13,987	24,226	48,451	3,219	0,805	1,394	2,787
15	26,306	6,577	11,391	22,782	3,158	0,79	1,367	2,735
20	10,269	2,567	4,446	8,893	3,076	0,769	1,332	2,664
25	5,309	1,327	2,299	4,598	2,974	0,743	1,288	2,575
30	3,877	0,969	1,679	3,357	2,856	0,714	1,236	2,473
35	2,446	0,612	1,059	2,118	2,724	0,681	1,18	2,359
40	1,455	0,364	0,63	1,26	2,583	0,646	1,119	2,237
45	1,252	0,313	0,542	1,085	2,437	0,609	1,055	2,11
50	1,153	0,288	0,499	0,998	2,289	0,572	0,991	1,982
55	0,866	0,216	0,375	0,75	2,144	0,536	0,928	1,857
60	0,694	0,173	0,3	0,601	2,006	0,502	0,869	1,737
65	0,683	0,171	0,296	0,592	1,878	0,47	0,813	1,627
70	0,618	0,155	0,268	0,535	1,765	0,441	0,764	1,528
75	0,511	0,128	0,221	0,443	1,668	0,417	0,722	1,444
80	0,489	0,122	0,212	0,423	1,59	0,398	0,689	1,377
85	0,489	0,122	0,212	0,424	1,534	0,383	0,664	1,328
90	0,437	0,109	0,189	0,378	1,5	0,375	0,649	1,299
95	0,412	0,103	0,179	0,357	1,448	0,372	0,645	1,289

100	0,446	0,111	0,193	0,386	1,5	0,375	0,649	1,299
105	0,438	0,109	0,19	0,379	1,533	0,383	0,664	1,327
110	0,388	0,097	0,168	0,336	1,586	0,391	0,687	1,373
115	0,403	0,101	0,174	0,349	1,657	0,414	0,718	1,435
120	0,459	0,115	0,199	0,398	1,744	0,436	0,755	1,51
125	0,443	0,111	0,192	0,384	1,843	0,461	0,798	1,596
130	0,399	0,1	0,173	0,346	1,951	0,488	0,845	1,689
135	0,439	0,11	0,19	0,38	2,063	0,516	0,893	1,787
140	0,494	0,124	0,214	0,428	2,178	0,544	0,943	1,886
145	0,441	0,11	0,191	0,382	2,289	0,572	0,991	1,983
150	0,362	0,091	0,157	0,314	2,395	0,599	1,037	2,074
155	0,401	0,1	0,173	0,347	2,491	0,623	1,079	2,157
160	0,487	0,122	0,211	0,422	2,574	0,644	1,115	2,229
165	0,483	0,121	0,209	0,418	2,642	0,66	1,144	2,288
170	0,438	0,11	0,19	0,379	2,692	0,673	1,166	2,331
175	0,462	0,115	0,2	0,4	2,723	0,681	1,179	2,358
180	0,496	0,124	0,215	0,43	2,733	0,683	1,183	2,367

Как видно из табл.1, все параметры Стокса изменяются только за счет увеличения угла рассеяния от 0° до 180° . Все они при рассеяниях вперед уменьшаются, а назад - увеличиваются и имеют минимум в точке рассеяния 90° . В нижних слоях облака (1-2км) параметры Стокса не зависят от длины волны и спектра облачных капель. Здесь имеет место релеевское рассеяние.

В табл.2 параметры Стокса существенно изменяются при изменениях угла рассеяния, увеличении спектра облачных капель и при длинах волн меньших 1см. А при длинах волн больших 1см параметры почти не меняются. На этой высоте облака спектр облачных капель изменился в сторону больших размеров, что и способствовало изменению величины параметров. Закономерность изменения параметров Стокса в нижних слоях облака нарушилась на этой высоте для длин волн меньших 1см, а для длин волн больших 1см она почти постоянна, т. е. все параметры Стокса имеют минимум.

В табл.3 параметры Стокса сильно изменяются при изменениях угла рассеяния, спектра облачных капель и при длинах волн, меньших 1см. На этой высоте облака появились крупные дождевые капли и сильно

изменились величины параметров Стокса. Здесь могут быть несколько экстремумов, нарушено релеевское рассеяние. Изменение этих параметров остается не существенным при длинах волн больших 1см.

На рис.1 приводятся кривые спектра облачных капель на высотах облака от его основания до высоты 5км (0,1,2,3,4,5км).

Как видно на рис.1 в нижних слоях облака (1-2км) превалирует конденсационный рост, капли растут очень слабо и изменения параметров Стокса не существенны, а в верхних слоях облака (3-5км) - коагуляционный рост, капли достигают дождевых размеров и параметры изменяются существенно.

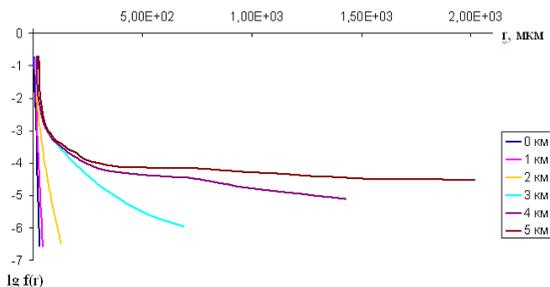


Рис. 1. Изменение спектра облачных капель с изменением высоты в облаке.

На рис.2 приводятся параметры Стокса для трех длин волн 0,5см, 1см и 5см на высоте 5км рассматриваемого облака. Как видно на рис.2 все параметры по виду одинаковые, отличаются они только по их величине. Три последних параметра получаются умножением первого на множители, образованные параметрами поляризации. На рис.2 видно, что величина параметров Стокса очень слабо зависит от высоты в облаке (от спектра облачных капель) при длинах волн равных и больших 1см. А при длинах волн меньших 1см спектр облачных капель существенно влияет на величину этих параметров.

Таким образом, для исследования структуры облаков и осадков поляризационными методами нужны параметры Стокса, которые полностью описывают состояние поляризации потока электромагнитного излучения.

Выводы

1. Параметры Стокса очень слабо зависят от спектра облачных капель и длины волны в нижних слоях облака. Эта зависимость начинается от 2км и существенно на высоких слоях облака (3-5)км для миллиметровых радиоволн, а для сантиметровых радиоволн изменения этих параметров не существенны.

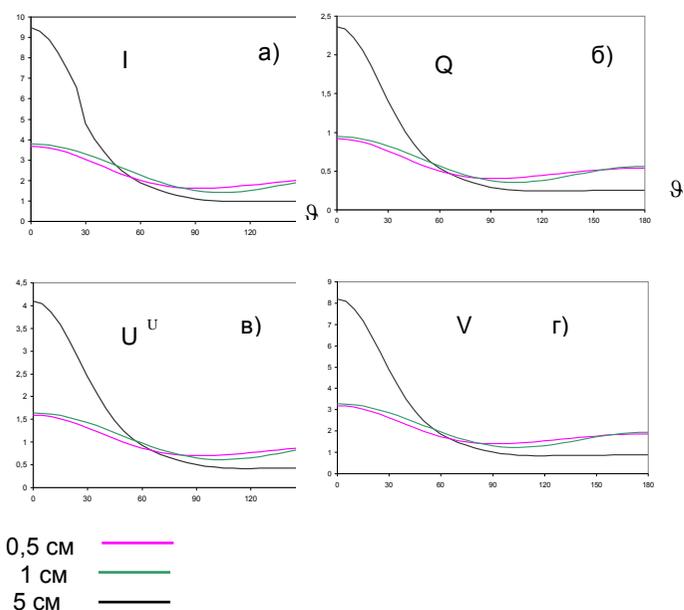


Рис. 2. Изменения параметров Стокса при длине волны 0,5, 1 и 5 см на высоте облака 5км.

2 Параметры Стокса существенно изменяются с изменением угла рассеяния при любых значениях длины волны и спектра облачных капель. Для сантиметровых радиоволн все параметры имеют минимум вблизи угла рассеяния 90° , а для миллиметровых радиоволн эта закономерность нарушается на высоких слоях облака (3-5)км и параметры Стокса сильно изменяются. На кривых параметров могут появиться несколько экстремумов.

3. Из всех расчетов следует, что параметры Стокса сильно изменяются с развитием конвективного облака для миллиметровых радиоволн, а для сантиметровых радиоволн – эти изменения незначительны. Последние три параметра Стокса зависят и от параметров поляризации.

Список литературы

1. Абшаев М. Т., Розенберг В.И. Расчеты характеристик рассеяния и ослабления радиолокационного излучения градинами с поверхностным слоем воды//Тр. ВГИ. 1969. Вып. 13. С. 183- 205.

2. Борен К, Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
3. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. - М.: ИЛ, 1961. 535с.
4. Деймерджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165с.
5. Дривинг А.Я., Михайлин И. М., Розенберг Г. В. Поляризационные индикатрисы рассеяния света приземным слоем атмосферного воздуха.- Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1967. Т.3. N 8. С. 908-913.
6. Жакамихов Х.М., Абшаев А.М. Численное исследование рассеяния микрорадиоволн спектрами однородных и двухслойных частиц осадков//Метеорология и гидрология. 2010. N 8. С. 26-32.
7. Жакамихов Х.М., Толмачев В.В. Об одном алгоритме расчета радиолокационных характеристик обводненных градин//Тр. ВГИ. 1989. Вып. 72. С. 62- 71.
8. Жекамухов М.К., Жакамихов Х.М. Теоретическая модель градового облака и активного воздействия на градовые процессы с помощью кристаллизующих реагентов//Тр. ВГИ. 1980. Вып. 45. С. 3-39.
9. Жекамухов М.К. , Жакамихов Х.М. Некоторые результаты численного моделирования процессов градообразования в облаках при естественном их развитии и при искусственном воздействии//Тр. ВГИ. 1983. Вып. 48. С. 13-27.
10. Зельманович И.Л., Шифрин К.С. Оптические характеристики полидисперсного облака для инфракрасной радиации//Тр. ВГИ. 1968. Вып. 8. С. 152-166.
11. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Об алгоритме расчета оптических характеристик двухслойных частиц. – В кн.: Физика мезосферы и мезосферных облаков. М.: Наука, 1974. С. 78-83.
12. Пришивалко А.П. Влияние относительной влажности воздуха на элементы матрицы рассеяния света системами однородных и неоднородных частиц атмосферного аэрозоля//Тр. ИЭМ. 1978. Вып. 18(71). С. 128-140.
13. Толмачев В.В., Пытьев Ю.П., Инюхин В.С. Поляризационные характеристики тающего града//Тр. ВГИ. 1989. Вып. 74. С. 65-70.
14. Шифрин К.С. Рассеяние света на двухслойных частицах.- Изв. АН СССР, серия геофиз., 1952, N2, с. 14-21.
15. Aden A.D., Kerker M. Scattering of elektromagnetik waves from two concentric spheres.- J. Appl. Physics, 1951, v. 22, N10, p. 1242-1245.
16. Fenn R.W., Oser H. Scattering properties of concentric soot-water spheres for visible and infraud light. – Appl. Optics, 1965, v. 4, N11, p. 1504-1509.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО АЭРОЗОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАПЕЛЬ

А.А. Синькевич, А.Б. Куров, Н.Н. Волков, Н.И. Баранова

ФГБУ «ГТО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

Введение

Наличие в атмосфере аэрозолей естественного происхождения оказывает влияние на процессы облако- и осадкообразования. Степень такого влияния зависит от концентрации частиц, их химического состава и т.п. К настоящему времени выполнено большое количество исследований, посвященных изучению как гигроскопических, так и льдообразующих свойств различных видов аэрозолей, а также воздействию, оказываемому ими на микроструктуру облаков. Исследования льдообразующих свойств, как правило, проводятся в лабораторных условиях и направлены на изучение эффективности реагентов для активных воздействий на облака и туманы. В данной работе рассматривается вопрос о влиянии частиц песка и глины на переохлажденные капли воды с целью оценки влияния аэрозолей естественного происхождения на эволюцию облаков.

Данные лабораторных исследований

Для исследования были использованы образцы песка и глины, собранные на территории Ленинградской области. Исследования проводились с помощью малой камеры «Капля», объемом $0,006 \text{ м}^3$, позволяющей изменять температуру внутреннего объема в диапазоне от $+20^\circ\text{C}$ до -25°C . В ходе работ изучалось лишь иммерсионное замерзание капель, при котором частицы песка и глины вводились внутрь капель дистиллированной воды. Исследуемые капли подвешивались в камере на тонкой синтетической нити вблизи от термопары, позволяющей фиксировать изменения температуры воздуха в зоне подвеса. В связи с тем, что при замерзании капель происходит выделение скрытой теплоты кристаллизации, данные о температуре позволяют достаточно точно зафиксировать момент схватывания. Кроме этого, капли располагались в поле зрения микроскопа с установленной на нем цифровой видеокамерой, что позволяло визуально наблюдать за процессом кристаллизации.

В ходе лабораторных экспериментов использовались две капли: капля суспензии, содержащая частицы образцов, и «контрольная» капля дистил-

лированной воды (рис.1а). Диаметр капель составлял около 1 мм. В выполненных экспериментах весовая концентрация частиц образцов в каплях изменялась в пределах от 1 до 5%.

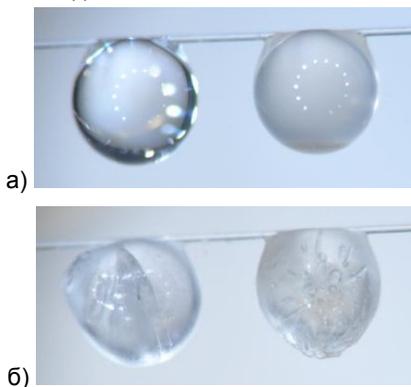


Рис.1. Капля дистиллированной воды (слева) и капля 5% водной суспензии песка (справа), подвешенные на синтетической нити внутри камеры «Капля»: а - до кристаллизации, б - после кристаллизации.

Для определения температуры кристаллизации капель внутренней объем камеры охлаждался от комнатной температуры до температуры около -20°C . На рис.2 приведена кривая изменения температуры воздуха в зоне подвеса исследуемых капель в одном из экспериментов с частицами песка.

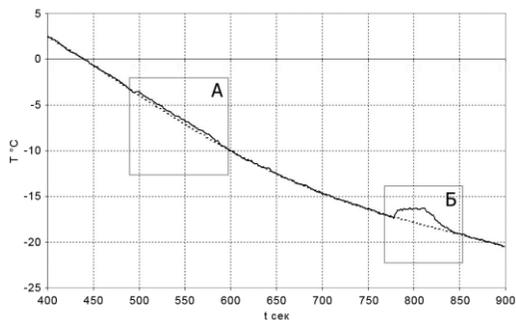


Рис.2. Изменение температуры воздуха в зоне подвеса исследуемых капель. А — увеличение температуры во время кристаллизации капли водной суспензии песка, Б — рост температуры, вызванный кристаллизацией капли дистиллированной воды.

При замерзании капли водной суспензии и капли дистиллированной воды наблюдается рост температуры, вызванный выделением скрытой теплоты.

ты кристаллизации. Как видно из графика, кристаллизация капли водной суспензии песка началась при $-3,7^{\circ}\text{C}$, а капли дистиллированной воды – при $-17,4^{\circ}\text{C}$. При этом при кристаллизации капли суспензии температура возросла приблизительно на $0,5^{\circ}\text{C}$, а при кристаллизации капли воды — на 2°C .

Пример закристаллизовавшихся капель представлен на рис.16. Процессы кристаллизации капель дистиллированной воды и суспензии несколько различаются. В случае капель воды кристаллизация начинается с поверхности капли. При дальнейшем протекании процесса кристаллизации, образовавшаяся ледяная корка способствует увеличению давления внутри капли, которое приводит, зачастую, к растрескиванию капли. В случае капли суспензии наблюдается выпадение крупных частиц в осадок, вследствие чего, кристаллизация таких капель начинается с нижней части. В среднем продолжительность процесса кристаллизации капель суспензий в проведенных экспериментах составляла около 100 секунд.

Зависимости температуры кристаллизации суспензий песка, глины и их смеси, полученные в ходе выполненных исследований, представлены на рис.3.

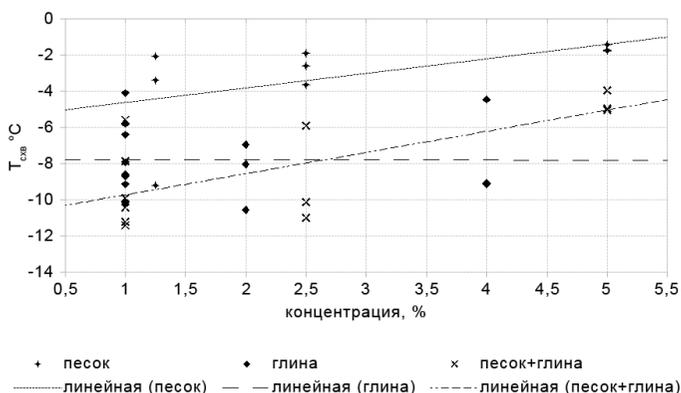


Рис.3. Зависимость температуры кристаллизации капель от концентрации исследуемых веществ (пунктирные линии - результат аппроксимации экспериментальных точек).

Из графика видно, что суспензия песка имеет более высокую температуру схватывания (начала кристаллизации) капель. Кристаллизация капель водной суспензии песка начиналась в диапазоне температур от $-9,2^{\circ}\text{C}$ до $-1,5^{\circ}\text{C}$, глины - от $-10,6^{\circ}\text{C}$ до $-4,1^{\circ}\text{C}$, а частиц смеси – от $-11,5^{\circ}\text{C}$ до -4°C . При этом, средняя температура кристаллизации «контрольных» капель дистиллированной воды, не имеющих примесей, в проведенных экспериментах

составила $-14,6^{\circ}\text{C}$. Увеличение концентрации частиц песка приводило к заметному увеличению температуры кристаллизации капель. Так, при концентрации 5% была отмечена максимальная температура кристаллизации, равная $-1,5^{\circ}\text{C}$.

Выводы

Проведенные лабораторные эксперименты показали, что наличие частиц песка и глины в капле воды приводит к существенному увеличению температуры кристаллизации капли. Наиболее сильное увеличение температуры кристаллизации капель отмечалось при вводе в каплю частиц песка. Увеличение концентрации песка ожидаемо приводит к росту температуры кристаллизации, однако, в экспериментах с частицами глины подобное поведение выражалось слабее.

При кристаллизации капель суспензии песка наблюдалось меньшее увеличение температуры воздуха в зоне подвеса капель, вызванное выделением скрытой теплоты, чем при кристаллизации капель дистиллированной воды без добавок. Это может быть связано с особенностями процесса кристаллизации капель суспензий.

Полученные данные позволяют предположить, что наличие высоких концентраций частиц песка и глины могут способствовать появлению наблюдаемых в облаках ледяных кристаллов при температурах выше -10°C .

Данные эксперимента указывают на то, что специально подготовленный песок может использоваться в качестве кристаллизующего реагента, однако здесь необходимо продолжить лабораторные эксперименты и выполнить натурные исследования.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, грант 13-05-92697.

КОНЦЕПЦИЯ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ГРАДА НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б.М. Хучунаев, С.Б. Хучунаева, А.Б. Хучунаев

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Воздействия на градовые процессы с целью уменьшения ущерба от града направлены на изменение естественного хода микрофизических про-

цессов, происходящих в градовых облаках, внесением льдообразующих частиц.

Для разработки надежных методов воздействия на облака необходимы достаточно полные знания о микрофизических процессах, происходящих в них. В данной работе приводятся результаты обобщения цикла работ, проведенных в ВГИ за последние годы, по натурным и лабораторным исследованиям механизма образования града.

Вкратце остановимся на основных результатах исследований, которые являются основой предложенной концепции образования града.

Результаты исследования механизма образования града на основе элементного анализа

В процессе роста градин в основном участвуют крупы и замерзшие капли. В интерпретации механизма образования капельных зародышей среди специалистов нет единого мнения. Одни считают, что во всех случаях град начинает расти на крупе, а капли, встречающиеся в срезах градин в качестве зародыша, являются вторичными, образованными в результате таяния крупы или же при срыве воды с мокро растущих градин. Нами были проведены специальные исследования, посвященные данному вопросу. Это исследования элементного состава зародышей и слоев естественных градин, анализ пузырьковым и изотопным методами уровней образования капельных зародышей естественных градин.

Анализ элементного состава зародышей и слоев градин позволяет решить некоторые вопросы, связанные с механизмом образования града. Так как распределение и размер частиц из различных элементов имеет свои особенности, например, хорошо известно, что частицы калия в атмосфере встречаются в виде наиболее мелких частиц, способных проникать в наиболее высокие слои, и являются пассивной примесью, а частицы Fe, Zn являются в большинстве случаев составной частью крупных аэрозольных частиц, измеряя содержание различных элементов в зародышах и слоях градин, можно получить ценную информацию о механизмах их образования, и, в частности, ответить на вопрос: на самом ли деле капельные зародыши являются вторичными? Нами были проведены специальные исследования по определению различных элементов в зародышах и слоях градин. Результаты этих исследований приведены в таблицах 1-4. В табл.1 приводится относительное содержание некоторых элементов в зародышах градин по отношению к Mg .

Таблица 1. Относительное содержание элементов в зародышах градин.

Тип зародыша	K/Mg	Al/Mg	Ca/Mg	Fe/Mg	Zn/Mg
крупа	17,8	6,6	0,14	1,3	1,2
капля	1,4	3,4	0,35	4,6	4,6

В табл.2 приводится относительное содержание Fe и Zn в слоях и зародышах градин.

Таблица 2. Относительное содержание Fe и Zn в слоях и зародышах градин.

Крупа	Капля	Сухой рост	Крупа	Капля	Сухой рост	Мокрый рост
0,09	5	0,1	0,06	3	0,006	0,04
0,04	3	0,08	0,09	3	0,01	0,02

Данные таблиц 1-2 показывают, что наиболее тяжелые элементы в большом количестве содержатся в капельных зародышах, а также то, что аэрозольный состав, а, следовательно, и аэрозольная среда, в которой они росли, сильно отличается от среды, где растут крупяные зародыши и слою градин. Некоторый интерес представляет анализ отношения Na/K, так как частицы, содержащие Na являются активными ядрами конденсации; капли на таких частицах образуются при 75% влажности, а K, как отмечалось, является пассивной примесью.

Таблица 3. Отношение Na/K в различных слоях и зародышах градин.

Дата градобития	капля	крупа	Мокрый рост	Сухой рост
14.09.84	3,75	0,39	-	0,11
7.06.84	2	0,59	0,04	0,1
31.05.86	3,4	0,8	0,52	-
5.06.86	7,8	-	0,002	1,1

Как видно из табл.3, соотношение Na/K в капельных зародышах в несколько раз выше, чем в крупяных зародышах и слоях градин. Если бы капельные зародыши образовались в результате таяния крупы или срыва капель с мокро растущих градин, то отношение Na/K в капельных зародышах и слоях градин и в крупяных зародышах не различались бы так сильно. Это приводит нас к выводу, что капельные зародыши образовались не в результате таяния крупы или срыва капель с мокро растущих градин. В табл.4 приводится абсолютное содержание различных элементов в зародышах и слоях градин.

Анализ данных табл.4 также показывает, что абсолютное содержание Na в капельных зародышах значительно больше, чем в крупяных зародышах и слоях градин.

Результаты вышеприведенных исследований показывают, что относительное и абсолютное содержание Na в капельных зародышах значительно выше, чем в крупяных зародышах и слоях градин, следовательно, основная часть капельных зародышей в исследованных градовых процессах не могла образовываться в результате таяния крупы или срыва капель с растущих градин.

Таблица 4. Содержание элементов в зародышах и слоях градин.

Элемент	Крупа x10 ⁻⁴ г/г	Мокрый рост x 10 ⁻⁴ г/г	Капля x10 ⁻⁴ г/г	Сухой рост x 10 ⁻⁴ г/г
N	2,4	3,48	10,75	0,53
O	2,85	7,82	21,18	1,85
Na	3,86	0,30	16,9	0,06
Mg	1,58	0,45	7,2	0,003
Al	0,12	0,45	0,701	0,01
Si	1,22	43,96	15,03	0,026
S	0,08	0,32	1,2	3,04
P	0,04	0,18	0,63	2,12
Cl	0,21	3,34	8,72	0,87

K	0,14	1,98	1,89	0,15
Ca	0,06	3,90	2,11	0,036
Cr	-	-	0,3	-
Fe	0,07	0,37	0,93	-
Zn	0,15	0,70	1,03	-

О
со-
бый
инте
те-
рес
пред
став

ляет содержание Cl в зародышах и слоях градин. В своих исследованиях С.М. Шметер [4] показывает, что при одних и тех же условиях содержание хлора в крупных каплях больше, чем в мелких. Следовательно, если в образовании того или иного слоя или зародыша градин участвовали крупные капли, то содержание хлора в них должно быть больше. По данным табл.4, крупяные зародыши и слои сухого роста образовались в среде более мелких капель, чем капельные зародыши и слои мокрого роста.

Анализ содержания Ag в зародышах и слоях градин показал, что кроме капельных зародышей во всех слоях и крупяных зародышах обнаружено содержание Ag. Если учесть то, что активные воздействия проводились на навес радиозеха, то единственным участком облака, куда реагент AgI не мог распространиться, является зона вблизи восходящих потоков, и вероятнее всего капельные зародыши образовались в этих зонах.

Результаты вышеприведенных исследований показывают, что элементный состав, а, следовательно, аэрозольная среда, в которой растут капельные зародыши, значительно отличается от среды, где растут крупяные зародыши и слои градин, значит капельные зародыши в градобитиях на Северном Кавказе не могли образовываться в результате срыва капель с мокро растущих градин, а так же путем таяния крупы. Начальным процессом образования капельных зародышей являются конденсационные и коагуляционные процессы, а не модификация крупы. Капельные зародыши образуются вблизи восходящих потоков.

Пузырьковый и изотопный методы исследование градин

Совместное использование изотопного и пузырькового методов позволяет получить дополнительную информацию для интерпретации механизма зарождения и роста града в облаках. Основываясь на результатах изотопного и пузырькового методов с учетом времени релаксации по изотопному составу, представляется возможным определение механизма образования

капельных зародышей. Температура кристаллизации по пузырьковому методу определялась по [3], по изотопному - по методике, описанной в [1,2]. Степень отклонения от изотопного равновесия определялась по формуле (1), которую приводит Джозел и др. [5]:

$$\Delta D_k = D_k - a D_n = (D_{k0} - D_{na}) e^{-t/t_0},$$

ΔD_k - отклонение изотопного состава от равновесия; D_k – изотопный состав капли на уровне кристаллизации; D_n - изотопный состав водяного пара; D_{k0} - изотопный состав капли при $t = 0$; t_0 - время релаксации по изотопному составу; t - промежуток времени, в течение которого происходит отклонение изотопного состава капель.

В табл.5 приводится температура образования капельных зародышей в градовом процессе 31.05.86 г., определенная изотопным и пузырьковым методом.

Таблица 5. Температура образования капельных зародышей пузырьковым и изотопным методом

n	D_c , mm	t_c , °C	t_2 , °C	n	D_c , mm	t_c , °C	t_2 , °C
1	4	-3,3	-26	12	2	-13	-11
2	4	-3,2	-2,1	13	5	-3,4	-2
3	4	-3,2	0	14	4	-9	-7
4	6	-1	-30	15	4	-8	-5
5	6	-3,2	0	16	2	-10	-9
6	5	-8	-5	17	5	-8	-5
7	3	-7	-3	18	1	-8,5	-8
8	4	-8	-6	19	4	-14	-13
9	3	-9	-7	20	4	-3,8	-3,8
10	2,4	-18	-16	21	0,7	-12	-12
11	2,4	-9	-8				

Обозначения в таблице: n- номер капельного зародыша градины; D_c - диаметр зародыша; t_c - температура образования капельного зародыша по пузырьковому методу; t_2 - температура образования капельного зародыша по изотопному методу. Проведем оценку отклонения от изотопного равновесия

для капли диаметром 3 мм (капля №7) и для капли минимального размера в этом градовом процессе - 0,7 мм (капля № 21).

Предположим, что на уровне с температурой 0°C обе капли были в изотопном равновесии с окружающим водяным паром. В этом случае с учетом температуры кристаллизации по пузырьковому методу отклонение от изотопного равновесия этих капель происходило в температурных интервалах для трехмиллиметровой капли от 0° до -7°C и капли 0,7мм - от 0° до -12°C. Определяя скорость восходящих потоков по методу термиком и воспользовавшись данными установившегося падения капель, найдем промежуток времени, при котором происходило отклонение от изотопного равновесия D: для капли 3мм $T_3 = 93$ с и для капли 0,7мм $T_{0,7}=100$ с.

Далее, находя по изменению содержания изотопов с высотой D_k, D_n и подставляя найденные значения в (1), получим для капли диаметром 3 мм $\Delta D_3=14$ и для капли с диаметром 0,7мм $\Delta D_{0,7} = 2$. При определении температуры отклонения изотопов на 14 относительных единиц формула дает ошибки более чем на 7°C, а отклонение на 2 единицы порядка 1°C. Из приведенной оценки следует, что для большинства капельных зародышей градин предположение об их изотопном равновесии некорректно. Температура кристаллизации капель, определенная по изотопному методу, из-за того, что система не приходит в изотопное равновесие, может быть как выше, так и ниже истинного уровня кристаллизации капельных зародышей. В случае, если капли образовались по механизму теплого дождя в низких слоях облака и кристаллизовались во время подъема в восходящем потоке, то температура, определенная по изотопному составу, будет выше, а во всех других случаях - ниже истинной температуры кристаллизации. При совместном анализе пузырькового строения и изотопного состава представляется возможным вычисление δD_0 .

Действительно, используя то, что капля диаметром 0,7мм находилась в изотопном равновесии и его изотопный состав $\delta D_0(t) = -116$ соответствует температурному уровню -12°C (определенному по пузырьковому методу) по формуле (1), получим $\delta D_0 = -142$. Зная δD_0 , можно определить изотопный состав конденсата на каждом температурном уровне.

Из 21 исследованных капель 16 образовались ниже уровня кристаллизации, вероятно, по механизму теплого дождя, а две капли выше уровня кристаллизации - в результате модификации крупы или же по другому механизму. Три капли были в изотопном равновесии, определить, как они образовались не возможно.

Совместное использование изотопного и пузырькового методов позволяет количественно оценить вклад механизма теплового дождя и других механизмов в образование капельных зародышей града.

Результаты лабораторного моделирования образования крупы и роста града на капельных и крупяных зародышах

Результаты лабораторного моделирования начальной стадии роста града показали, что скорость роста агрегатов кристаллов описывается эмпирической формулой:

$$V_p = 12N \exp(-0,25 + 0,12N - 0,37t + 0,541g), \quad (2)$$

где V_p – скорость роста агрегатов кристаллов; N – концентрация кристаллов в камере; t – температура; g – влажность.

С увеличением влажности увеличивается скорость роста крупы. Сравнение этих результатов с ранее полученными данными показывает, что скорость роста крупы при концентрациях кристаллов 10^4 м^{-3} в два - три раза меньше, чем при концентрациях кристаллов $10^7 - 10^8 \text{ м}^{-3}$. Ранее нами было установлено, что изменение концентрации кристаллов с 10^8 м^{-3} до 10^9 м^{-3} не приводит к существенному увеличению скорости роста крупы.

Результаты экспериментальных исследований роста града на капельных и крупяных зародышах показывают, что рост града можно описать формулой:

$$R = R_0 + \frac{E[R]}{4\rho_s} W q \Delta t, \quad (3)$$

где R_0 – первоначальный радиус градины; q – влажность облака; W – скорость воздушного потока в камере.

При росте града на крупяных зародышах четкой зависимости между коэффициентом роста ($K = \frac{E(R)\rho_s}{\rho_l}$) и влажностью не наблюдается. Это связано с тем, что рыхлая структура, какой является крупа, при захвате крупных капель не успевает закристаллизоваться и затягивается внутрь как в капиллярах. При маленьких влажностях коэффициент роста принимает значение чуть больше трех. Это связано с тем, что при таком росте образуется лед плотностью $0,2 - 0,4 \text{ г/см}^3$. При увеличении влажности нижний слой градины начинает впитывать воду, и коэффициент роста становится отрицательным, или же рост незначителен.

В некоторых случаях при больших влажностях уменьшение радиуса градин указывает на то, что скорость кристаллизации не обеспечивает кристаллизацию всей воды, захваченной градиной, некоторая часть воды впитывается внутрь градины, другая часть может покинуть градину. Количест-

во пропитанной воды соизмеримо с массой, захваченной из облачной среды.

Срезы искусственных градин показывают наличие в порах льда незакристаллизованной воды. Результаты проведенных экспериментов показывают, что коагуляционный рост градин зависит от водности и от подложки, на которой происходит рост. Даже при отрицательных температурах происходит уменьшение размера градины, что связано с таянием верхнего слоя в результате пропитки водой.

Анализ натуральных исследований с учетом результатов лабораторного моделирования позволяет построить схему образования града (см. рисунок). На схеме можно выделить три возможных механизма образования града. Первый: образование крупяных и капельных зародышей - рост слоев. Второй: образование кристаллов - агрегатов кристаллов - пропитка – крупа, параллельно: образование капельных зародышей - рост слоев - образование града. Третий механизм образования кристаллов: агрегаты – пропитка агрегатов – кристаллизация – град.

Образование града по первому механизму – это общепринятый механизм образования града.

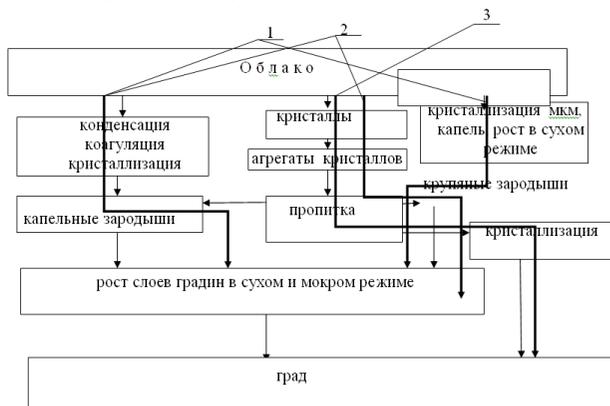


Схема роста града: 1– первый механизм образования града; 2–второй механизм образования града; 3– третий механизм образования града.

По второму механизму град образуется в две стадии. На первой стадии в результате агрегации кристаллов в зонах с малыми скоростями восходящих потоков образуются частицы льда с малыми плотностями в виде снежных хлопьев (агрегаты кристаллов). По мере возрастания скорости восходящих потоков происходит пропитка снежных хлопьев облачными каплями и

конденсированной влагой. Пропитка нижней части градины значительнее, она становится ориентированной в восходящем потоке. Это приводит к образованию конических градин. Дальнейший рост градин происходит в восходящем потоке в условиях влажного или мокрого режима. Некоторые градины в результате пропитки становятся источниками капель, значительная часть которых захватывается другими градинами, остальные успевают закристаллизоваться и превратиться в капельные зародыши. Основная часть капельных зародышей образуется в нижних слоях по механизму теплого дождя, и, двигаясь в восходящем потоке, попадает в зону роста града. Градины, образованные на капельных зародышах, как правило, имеют сферическую форму, градины, образованные на крупяных зародышах, наиболее часто конической формы.

Третий, возможный механизм образования градин, аналогичен второму, но без роста слоев. При реализации второго и третьего механизмов образования града (через агрегацию кристаллов) агрегаты кристаллов имеют малую плотность, поэтому продуваются воздушными потоками, происходит конденсация и коагуляция, это приводит к значительной пропитке агрегатов из кристаллов. При нарушении скелетной структуры агрегатов роль конденсации становится незначительной и влажность в облачной среде возрастает, поэтому становится возможным дальнейший рост слоев градин во влажном и сухом режимах, т.е. реализуется второй механизм роста града. Если скелетная структура агрегатов сохраняется, происходит высушивание облачного воздуха, что приводит к испарению капель. Вода в агрегатном каркасе кристаллизуется, и образуются градины по третьему механизму образования града. Самый быстрый рост града происходит при реализации третьего механизма. В начальной стадии после образования агрегатов кристаллов рост массы за счет конденсации значителен, так как агрегаты спускаются с верхних слоев атмосферы и продуваются потоками. Эти результаты подтверждаются экспериментами, которые проводились в закрытой трубе, где производилась прокачка облачного воздуха через матерчатые фильтры, которые находились друг от друга на расстоянии 5-7см. Эти эксперименты показали, что количество воды, улавливаемое фильтрами, одинаково, что указывает на значительную роль конденсации при пропитке агрегатов кристаллов облачной водой. Реализация данного механизма приводит к уменьшению относительной влажности, и как следствие – к испарению капель. При реализации этого механизма капельные зародыши не образуются, градины как губки поглощают воду, которая впоследствии замерзает и образуются большие бесформенные градины. Типичным примером реализа-

ции такого механизма является градовый процесс 05.05.1983г. в районе г. Нальчик, максимальный диаметр градин в этом градобитии составил 60 мм.

Список литературы

1. Тлисов М.И., Малкаров А.С. Измерения изотопного состава водорода в градинах//Тр. ВГИ. 1989. Вып.72. С. 121-129.
2. Тлисов М.И., Хучунаев Б.М., Малкаров А.С. Пузырьковые и изотопные методы исследований капельных зародышей града//Тезисы Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 1991.
3. Тлисов М.И., Эмба Я.А., Хучунаев Б.М. Исследование воздушных включений в капельных зародышах градин//Тр. ВГИ. 1987. Вып.59. С.11-20.
4. Шметер С. М. О содержании хлора в воде облаков в связи с их микроструктурой//Тр. ЦАО. 1955.Вып. 9. С. 57-61.
5. Jouzel I, Merlivat L, Roth E. Isotopic study of hail//I. Gophys Res. 1975. Vol. 80. № 35.P. 5015-5030.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РОСТА ГРАДА НА КРУПЯНЫХ И КАПЕЛЬНЫХ ЗАРОДЫШАХ

**Б.М. Хучунаев, М.И. Тлисов, А.А. Ташилова, Н.В. Теунова,
А.Б. Хучунаев**

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Работа посвящена исследованию особенностей роста ледяной фазы на различных зародышах и слоях градин.

Исследование роста града на капельных и крупяных зародышах проводилось на аппаратуре и по программе, которая описана в ранних работах авторов [2,3].

До начала эксперимента на резиновой нитке диаметром 1-2 мм подвешивался зародыш града, в дальнейшем включался вентилятор, в камеру запускались капли микронного размера, при помощи видеокамеры производилась съемка, параллельно отбирались пробы капель из облачной среды. На рис.1 приведена фотография крупяного зародыша градины в камере.

Для определения изменения радиуса градины при росте ее в жидко-капельной среде использовалось уравнение [1]:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\pi}{3} \int_0^R \left(\frac{R+r}{R} \right)^2 [V(R) - V(r)] n(r) r^3 E(R, r) \quad (1)$$

где R - радиус градины, мкм; r -радиус облачных капель, мкм; $V(R), V(r)$ - скорость падения градины и облачных капель соответственно, см/с; $n(r)$ – число частиц с радиусом r ; $E(R, r)$ - коэффициент захвата градиной облачных капель.



Рис.1. Фотография крупяного зародыша градины в камере.

При $R \gg r$ с учетом условий роста градины в камере получим уравнение для расчета изменения радиуса градины:

$$\Delta R = \frac{E(R)}{4\rho_{\lambda}} Wq\Delta t \quad (2)$$

где W - скорость воздушного потока в камере, см/сек; q -водность, г/см³; ρ_{λ} – плотность льда, г/см³; Δt – время роста, мин.

В связи с тем, что на данном этапе выполнения работы плотность наращенного слоя льда невозможно определить, для сравнения расчетных и экспериментальных данных был введен коэффициент $K = \frac{E(R)\rho_B}{\rho_{\lambda}}$, назван-

ный в дальнейшем коэффициентом роста. При стремлении плотности слоя градины к плотности воды K стремится к значению коэффициента захвата. Чем меньше плотность слоя роста градин, тем больше разница между коэффициентом роста и коэффициентом захвата. Если принять, что плотность слоев и зародышей градин может изменяться от 0,3 до 0,98 г/см³, то коэффициент роста может изменяться от 3,3 $E(R)$ до 0,10 $E(R)$.

В табл.1 приведены результаты лабораторных исследований роста града на капельных зародышах и расчеты роста града на капельных зародышах по формуле (2) при различных коэффициентах роста. Скорость

воздушного потока постоянная во всех экспериментах и составляет $W=140$ см/сек.

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные значения роста града (капельный зародыш).

Эксперимент, №№	Время роста, мин	Водность, г/м ³	Коэффициент роста K	Изменение ΔR градины, мкм
1	44	0,62	0,2	70
			0,1	
2	119	0,67	0,3	345
			0,2	
3	30	1,27	1	770
			0,9	
4	30	1,2	0,9	650
			0,8	
5	50	1,03	0,7	650
			0,6	
6	20	0,97	0,8	300
			0,7	

Как видно из табл.1, скорость роста градины на капельном зародыше зависит от водности, с увеличением водности коэффициент роста K увеличивается. В зависимости от водности коэффициент роста K изменяется от 0,1 до 1. Аналогичные результаты следуют из работы Н.С. Шишкина: для развития процесса коагуляции капель необходимо присутствие в спектре частиц с радиусом 15 мкм и более [4]. На рис.2 представлены результаты экспериментов с минимальным коэффициентом захвата 0,1 при водности $q=0,62$ г/м³ и максимальным ≈ 1 при водности $q=1,27$ г/м³.

На рис.3 приводится график изменения коэффициента роста K при изменении водности для всех шести экспериментов. Такая зависимость объясняется тем, что при увеличении водности увеличивается доля облачных капель радиусами более 15 мкм, с которыми коэффициент коагуляции растущих градин больше.

Как видно из графика (рис.3), с увеличением водности происходит увеличение коэффициента роста K , при достижении водности около 1 г/м³ происходит скачкообразное уменьшение коэффициента роста K , при дальнейшем увеличении водности коэффициент K продолжает расти.

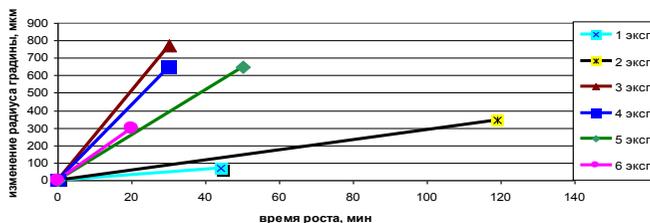


Рис.2. Изменения экспериментального радиуса градины (капельный зародыш) при различных условиях.

Такое явление при росте капель не наблюдается. Скачкообразное уменьшение коэффициента роста K , скорее всего, связано с тем, что при водностях около 1 г/м^3 увеличивается плотность льда, и некоторая часть воды успевает впитаться во внутренние слои растущей градины.

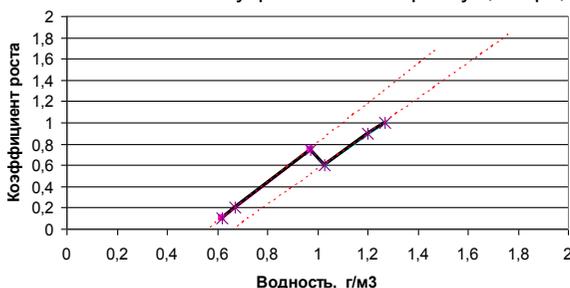


Рис.3. Зависимость коэффициента роста K от водности при росте града на капельных зародышах.

Для исследования роста града на крупяных зародышах града было проведено 19 экспериментов в облачной камере, где на нити подвешивался крупяной зародыш (крупя).

На рис.4 и в табл.2 приводятся результаты исследования экспериментов по росту градины на крупяных зародышах.

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные значения роста града (крупяной зародыш).

Эксперимент, №№	Время роста, мин	Водность, г/м^3	Кoeffициент роста K	Изменение ΔR градины, мкм
1	24	0,526	1	255
			0,9	

2	30	0,2974	1	175
			0,9	
3	24	0,074	> 1	200
4	30	0,1202	< 0	-210
5	24	0,4405	< 0	-210
6	24	1,1738	0,2	70
			0,1	
7	12	1,634	< 0	-10
8	12	0,5875	0,2	25
			0,1	
9	12	0,806	0,4	65
			0,3	
10	24	1,26	0,5	260
			0,4	
11	24	1,018	1	585
			0,9	
12	12	1,179	0,3	60
			0,2	
13	12	1,8865	0- 0,1	35
14	18	1,847	0- 0,1	55
15	18	0,6345	0- 0,1	20
16	24	0,443	< 0	-5
17	18	0,82	0- 0,1	25
18	24	1,49	0,2	120
			0,1	
19	24	1,289	< 0,1	40

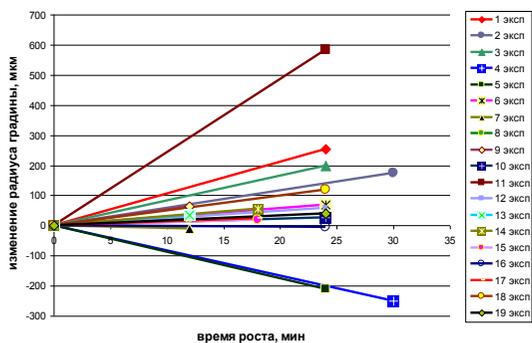


Рис.4. Изменения экспериментального радиуса градины (крупной зародыш) при различных условиях.

Из табл.2 и рис.4 видно, что из 19 экспериментов только в одном случае (3-й эксперимент), коэффициент роста почти в 3 раза превышал 1, несмотря на то, что рост происходил при наименьшей влажности из всех экспериментов, $q=0,074 \text{ г/м}^3$. В трех случаях (эксперименты 1, 2 и 11) коэффициент роста принимал значения близкие к 1. В экспериментах 9,10 и 12 значение K колебалась между 0,2 и 0,5. В восьми случаях (6,8,13,14,15,17,18,19 эксперименты) коэффициент роста находится в пределах 0-0,1. В 4 и 5 экспериментах коэффициент роста принимает отрицательное значение, при этом происходит значительное уменьшение размера градины на 250 и 210 мкм при влажностях $0,1202 \text{ г/м}^3$ и $0,4405 \text{ г/м}^3$ соответственно. В 7 и 16 экспериментах размер градины уменьшался незначительно.

Таким образом, в результате проведенных исследований получено, что коэффициент роста K на капельных зародышах зависит от влажности, с увеличением влажности увеличивается и коэффициент роста K . Имеется некоторое критическое значение температуры и влажности, при достижении которого происходит скачкообразное уменьшение коэффициента роста K .

Коэффициент роста K зависит от структуры льда, на котором происходит рост градины. При росте льда на зародыше или слое градин с небольшой плотностью происходит его пропитка водой, это приводит к уменьшению коэффициента роста, при этом коэффициент захвата может не изменяться. В отдельных случаях коэффициент роста принимает отрицательное значение, это связано с таянием наружного слоя градины при пропитке.

Список литературы

1. Роджерс Р.Р. Краткий курс физики облаков//Пер. с англ. под ред. Мазина И.П. . – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 231 с.
2. Хучунаев Б.М., Хучунаев А.Б. Аппаратура и методика лабораторного моделирования начальной стадии роста града//Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион, №4, 2010г., с.64-67.
3. Хучунаев Б.М., Хучунаев А.Б., Панаэтов В.П., Степанова С.И., Теунова Н.В. Лабораторное моделирование роста крупных зародышей града//Известия КБНЦ РАН, №1, 2013 г., с.71-75.
4. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозное электричество.- Л.: Гидрометеоздат, 1964. – 411 с.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕАГЕНТА С ОБЛАЧНОЙ СРЕДОЙ

Б.М. Хучунаев, А.А. Ташилова, Н.В. Теунова, Р.А. Ажахова
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Научной основой технологий изменения погоды является изменение естественного хода микрофизических и динамических процессов в облаках за счет реализации их фазовой и коллоидальной неустойчивости. Несмотря на определенные научные, технические и технологические достижения в этой области, до настоящего времени недостаточно изученными и крайне важными остаются вопросы взаимодействия реагента с искусственной облачной средой.

Для проведения лабораторного моделирования взаимодействия реагента AgI с облачной средой был использован комплекс аппаратуры: большая облачная камера (рис.1), парогенератор (рис.2), аэрозольная ловушка (рис.3), гигрограф для измерения влажности в камере [2].



Рис.1. Большая облачная камера. 1—пульт управления; 2—генератор низких частот; 3—тепловизор; 4—окошко для доступа в камеру во время проведения экспериментов; 5—смотровое окно; 6— система регулировки температуры.

Исследования микроструктурных характеристик искусственного облака в камере проводились с использованием барабанной ловушки, методом улавливания облачных капель на пластинку, покрытую тонким слоем специального масла и помещенную в поток воздуха (рис.3). В трубе 1 с помощью вентилятора 3, приводимого в движение электромотором 4, создается стационарный поток воздуха, засасываемого из камеры со скоростью воздушного потока 5 м/с.

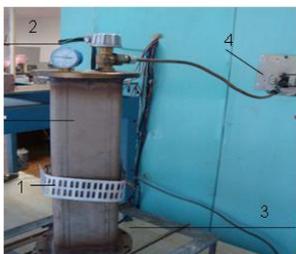


Рис.2. Парогенератор.1 – емкость для воды; 2 – манометр; 3 – нагревательный элемент; 4–клапан.

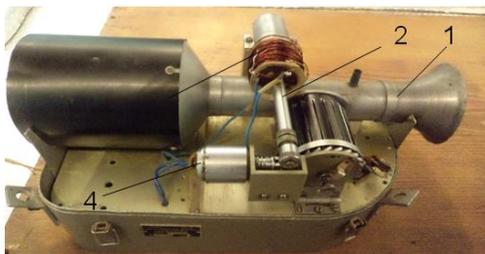


Рис.3. Аэрозольная ловушка.1–труба; 2–стеклянная пластинка; 3–вентилятор; 4–электромотор.

В поток из барабана под воздействием электромагнита выдвигается стержень со стеклом и происходит осаждение капель. Время экспозиции - 2 секунды. Стекла с осажденными каплями фотографируются под микроскопом с помощью видеокамеры и записываются на персональный компьютер. В дальнейшем производится измерение характеристик спектра капель. На рис.4 приводится фотография спектра капель, полученных таким образом. По спектру распределения капель по размерам определяется водность в камере.

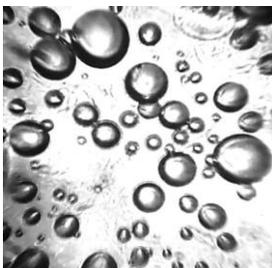


Рис.4. Фрагмент подложки с каплями.

Определение льдообразующей активности реагентов связано с подсчетом ледяных кристаллов, выпадающих на подложку при введении в искусственное облако определенного количества льдообразующего реагента в виде аэрозоля. Подложка представляет собой металлический диск $d = 4$ см, покрытый чистым стеклом. Фрагмент подложки с кристаллами представлен на рис.5.

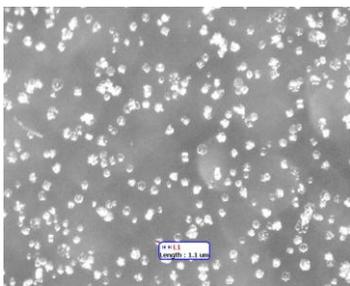


Рис.5. Фрагмент подложки с кристаллами.

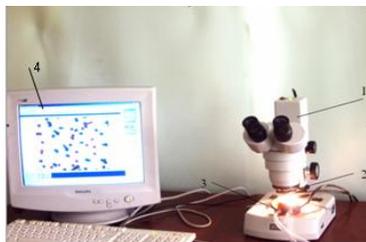


Рис.6. Аппаратура для регистрации ледяных кристаллов. 1– оптический микроскоп, 2 – видеокамера, 3 – термостол, 4- персональный компьютер.

Ледяные кристаллы подсчитываются с помощью аппаратно-программного комплекса (рис.6), включающего в себя: оптический микроскоп (1) с видеокамерой (2), термостол (3), персональный компьютер (4), программное обеспечение [3]. Результаты экспериментов приведены в табл.1.

С помощью статистической программы SPSS 10.0 был проведен корреляционный и регрессионный анализ и получено, что коэффициент корреляции Пирсона для удельного выхода кристаллов и массы реагента R равен « $-0,625$ » (табл.2), то есть имеется обратная зависимость удельного выхода от массы внесенного реагента, что видно на диаграмме рассеяния (рис.7) [1]. Для того чтобы коэффициент корреляции являлся значимым, необходимо чтобы ошибка p (уровень значимости Sig) при отклонении этого утверждения не превышала 5% (Sig <0,05) при 95%-ном доверительном интервале. В нашем случае уровень значимости Sig = 0,000, что значительно меньше 0,05, следовательно, коэффициент корреляции значимый.

Таблица 1. Результаты экспериментов по взаимодействию реагента с облачной средой в большой облачной камере.

№ эк. сп.	Т, °С		Масса реагента, мг	Средне куб. диам. капель, мкм	Конц. капель, м ⁻³ *10 ⁸	Водность, г/м ³	Конц. кристалл. м ⁻³ *10 ⁸	Сред. арифм. площадь 1 кристалла, мм ² *10 ⁻⁴	Удельный выход кристаллов, *10 ¹¹
	min	max							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-12,3	-8,0	0,4	4,64	3,1	1,8	3,97	1,68	10
2	-11,5	-6,2	0,4	4,66	3,9	2,4	0,76	15,6	2
3	-11,0	-5,9	0,1	3,8	12	1,9	3,11	2,0	31
4	-10,0	-5,8	0,1	3,8	13	3,9	3,04	1,9	30
5	-11,1	-8,1	0,5	3,5	11	2,5	2,85	2,0	5,7
6	-11,2	-6,3	0,5	2,9	0,7	0,9	2,4	2,5	4,8
7	-12,3	-8,1	0,5	3,3	4,9	0,8	1,4	3,1	2,8
8	-12,5	-7,6	0,65	3,0	5,0	1,2	1,13	2,0	1,7
9	-11,2	-7,5	0,18	3,8	9,0	2,4	1,73	2,0	9,6
10	-11,1	-5,5	0,18	2,9	8,8	1,1	1,65	3,4	9,2
11	-9,6	-6,4	0,18	3,8	8,6	1,8	1,79	3,0	9,9
12	-12,0	-6,8	0,125	4,3	1,0	0,45	2,54	2,0	20
13	-11,1	-7,1	0,125	4,27	8,0	3,4	2,01	2,5	16
14	-11,7	-8,0	0,125	3,8	5,6	1,6	1,57	2,9	13
15	-11,6	-7,3	0,22	3,0	9,4	1,45	1,19	3,8	5,4
16	-12,3	-8,1	0,22	3,8	18	2,0	1,17	3,4	5,3
17	-10,0	-5,0	0,21	5,5	3,9	3,5	2,07	2,4	10
18	-10,5	-8,1	0,21	4,8	6,1	3,5	2,42	2,0	11
19	-12,5	-6,4	0,21	5,8	2,9	3,0	2,47	2,0	12
20	-11,3	-4,8	0,21	3,7	11	3,0	1,12	4,1	5,3
21	-12,5	-6,6	0,21	3,4	6,3	1,4	1,75	1,7	8,3
22	-12,0	-6,4	0,21	3,7	2,7	0,45	1,52	2,7	7,3
23	-12,6	-6,7	0,21	3,3	12	2,3	2,25	2,5	11
24	-12,1	-6,1	0,23	5,3	1,6	1,0	2,14	2,6	9,3
25	-11,5	-8,1	0,23	3,9	7,1	2,3	2,33	2,6	9,7
26	-10,9	-5,7	0,23	6,5	2,0	3,2	1,58	2,6	6,7
27	-11,2	-6,3	0,23	4,5	1,9	0,9	1,52	2,3	6,7
28	-11,1	-6,0	0,23	3,0	4,2	0,5	1,28	2,25	5,6

Таблица 2. Корреляция.

Коэффициент корреляции Пирсона, R		Масса реагента, мг
	Удельный выход	-0,625
Sig. (2-tailed)		0,000
N		28

* Корреляция при уровне значимости 0,05 %.

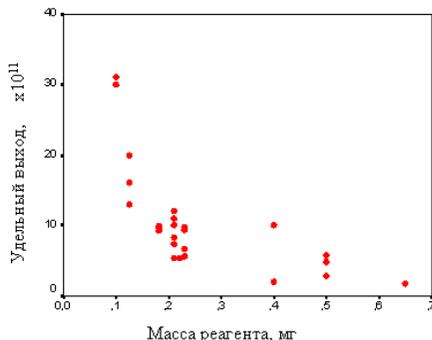


Рис.7. Диаграмма рассеяния: удельный выход кристаллов - масса реагента.

Поскольку коэффициент корреляции Пирсона высокий, для пары «удельный выход кристаллов – масса реагента» можно построить уравнение зависимости удельного выхода кристаллов от массы внесенного реагента (уравнение регрессии). Коэффициент детерминации равен 0,391, это объясняет 39,1 % дисперсии, описанной в уравнении регрессии.

Используя коэффициенты из табл.3, получим уравнение регрессии:

$$N = k \cdot (b_0 - b_1 m_{\text{pear}}), \quad (1)$$

где N – удельный выход кристаллов, г^{-1} ; $k = 10^{11} \text{ г}^{-1}$; $b_0 = 18,1$; $b_1 = -31,94 \text{ мг}^{-1}$; m_{pear} – масса внесенного реагента, мг.

Таблица 3. Коэффициенты регрессионной модели

	Не стандартизированные коэффициенты	Стандартная ошибка, δ	Стандартизированные коэффициенты	Уровень значимости, Sig
Константа, b_0	18,10	2,25		0,000
Масса реагента, b_1	-31,94	7,82	-0,625	0,000

Зависимая величина – удельный выход кристаллов.

Зависимость удельного выхода от водности в облачной камере имеет коэффициент корреляции $R=0,294$, при уровне значимости $Sig=0,128>0,05$. Следовательно, коэффициент корреляции незначимый. На рис.8 видно, что имеются 3 высоких значения удельного выхода кристаллов $q_1= 20 \cdot 10^{11}$, $q_2= 30 \cdot 10^{11}$, $q_3= 31 \cdot 10^{11}$, которые, вероятно, являются выбросами за счет ошибок измерений.

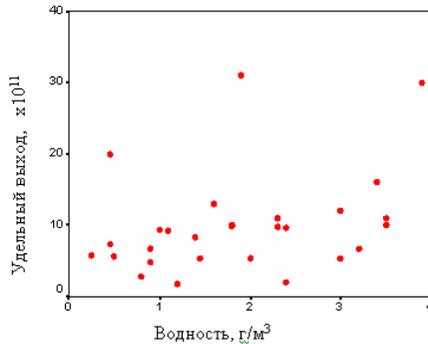


Рис. 8. Диаграмма рассеяния: удельный выход кристаллов – водность в камере.

Исключив три выброса, исследуем зависимость удельного выхода кристаллов от водности в камере. Получено, что коэффициент корреляции увеличился до значения $R=0,457$ при $Sig=0,022$ ($Sig<0,05$) (табл.4).

Таблица 4. Корреляция.

Коэффициент корреляции Пирсона, R		Удельный выход кристаллов
	Водность	0,457
Sig. (2-tailed)		0,022
N		25

* Корреляция при уровне значимости 0,05 %.

Таблица 5. Коэффициенты регрессионной модели.

	Не стандартизированные коэффициенты	Стандартная ошибка, δ	Стандартизированные коэффициенты	Уровень значимости, Sig
Константа, C_0	5,03	1,34		0,01

Водность, с ₁	1,57	0,64	0,46	0,022
-----------------------------	------	------	------	-------

Зависимая величина – удельный выход кристаллов.

Используя коэффициенты из табл.5, получим уравнение регрессии:

$$N = k \cdot (c_0 + c_1 q), \quad (3)$$

где N – удельный выход кристаллов; $k = 10^{11} \text{ г}^{-1}$; $c_0 = 5,03$; $c_1 = 1,57 \text{ м}^3/\text{г}$; q – водность, $\text{г}/\text{м}^3$.

Применим метод множественной регрессии для получения зависимости удельного выхода кристаллов от двух независимых переменных: водности и массы внесенного реагента, исключив выбросы. Коэффициент детерминации в случае множественной регрессии увеличился до 0,718. Это говорит о дополнительном вкладе в объясненную дисперсию, полученную в результате включения во множественный регрессионный анализ параметра «водность».

Таблица 6. Коэффициенты множественной регрессионной модели

	Не стандартизированные коэффициенты	Стандартная ошибка, δ	Стандартизированные коэффициенты	Уровень значимости, Sig
Константа, b_0	10,87	1,89		0,01
Масса реагента, b_1	-15,637	4,19	-0,61	
Водность, c_1	0,71	0,56	0,21	0,218

Зависимая величина – удельный выход кристаллов.

Используя коэффициенты из табл.6, получим уравнение множественной регрессии:

$$N = k \cdot (b_0 + b_1 m_{\text{реаг}} + c_1 q), \quad (4)$$

где N – удельный выход кристаллов ($\times 10^{11}$), г^{-1} ; $k = 10^{11} \text{ г}^{-1}$; $b_0 = 10,87$; $b_1 = -15,64 \text{ мг}^{-1}$; $m_{\text{реаг}}$ – масса внесенного реагента, г; $c_1 = 0,71 \text{ м}^3/\text{г}$; q – водность, $\text{г}/\text{м}^3$.

Полученное уравнение множественной регрессии подтверждает, что удельный выход кристаллов растет с увеличением водности в камере и уменьшением массы внесенного диспергированного реагента. Стандартизированные коэффициенты регрессии β ($\beta_{\text{массы}} = -0,61$, $\beta_{\text{водности}} = 0,21$) показы-

вают, что масса внесенного реагента в три раза больше влияет на удельный выход кристаллов, чем величина водности в камере.

Список литературы

1. Бююль А., Цефель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. СПб.: ДиаСофтЮП, 2002. С. 608.

2. Хучунаев Б.М., Хучунаев А.Б. Аппаратура и методика лабораторного моделирования начальной стадии роста града//Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2010. №4. С.64-67.

3. Хучунаев Б.М., Хучунаев А.Б., Панаэтов В.П., Степанова С.И., Теунова Н.В. Лабораторное моделирование роста крупных зародышей града//Известия КБНЦ РАН. 2013. №1. С.71-75.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ НАД О. КУБА ПО ДАННЫМ САМОЛЕТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А.М. Струнин, М.А. Струнин

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный

Введение

Турбулентность и воздушные движения являются определяющими факторами как образования и развития облаков различных форм, так и распространения реагентов при воздействиях на облака, поэтому получение статистически обеспеченных данных об интенсивности турбулентности, ее пространственной и, в особенности, о ее спектральной структуре является одной из важнейших задач по исследованию атмосферы. К сожалению, в настоящее время не существует модели спектральной структуры турбулентности и турбулентных потоков тепла в облаках вертикального развития, в литературе имеются лишь отдельные данные о спектральных плотностях пульсаций скорости ветра [2].

Настоящая работа ориентирована на восполнение имеющегося пробела, а данные, на которых она основана, были получены в рамках российско-кубинского эксперимента по исследованию облаков над о. Куба в августе – октябре 2007 г. [3]. На борту самолета АН-26 была установлена аппаратура

для измерения и регистрации пульсаций горизонтальной (продольной, по отношению к направлению полета самолета) компоненты скорости ветра u' , вертикальной компоненты скорости ветра w' и пульсаций температуры T' . Регистрация данных осуществлялась с частотой 20 отсчетов в с на жестком диске бортового компьютера. Для условий горизонтального установившегося полета (т.е. при малости изменений углов крена, тангажа и скольжения) турбулентные пульсации определялись из выражений [3]:

$$u' = -U + U_p + U \sin \Delta\alpha \sin \Delta\theta + U \sin \Delta\alpha, \quad (1)$$

$$w' = (\Delta\alpha - \Delta\theta)U + L\dot{\theta} + W_p, \quad (2)$$

где $\Delta\alpha$ - приращения угла атаки воздушного потока, набегающего на самолет; $\Delta\theta$ - приращения угла тангажа на горизонтальном режиме полета самолета; $L\dot{\theta} + W_p$ - суммарная скорость собственного вертикального перемещения самолета и вращения самолета вокруг поперечной оси. Приращения угла атаки набегающего на самолет потока вычислялись по приращениям перегрузки центра тяжести самолета. Путевая скорость самолета U_p определялись по показаниям установленной на самолете системы глобального позиционирования GPS. Суммарная скорость собственного вертикального перемещения самолета W_p и вращения самолета вокруг поперечной оси $L\dot{\theta}$ вычислялась интегрированием приращений вертикальной перегрузки самолета Δn и дифференцирования изменений барометрической высоты самолета h_b . Для расчета истинных значений пульсаций температуры воздуха T' использовалась следующая формула:

$$T' = T - \bar{T} + \eta \Delta h_b, \quad (3)$$

где η - вертикальный градиент температуры воздуха на уровне полета самолета; \bar{T} - средняя температура воздуха, определенная по всему измерительному участку; Δh_b - изменения барометрической высоты самолета на этом участке. Градиент температуры определялся по результатам вертикальной зондировки при подъеме на рабочую высоту перед началом исследований облаков.

Отметим, что за время измерений, продолжительность которых составляла в каждом полете около часа, градиент мало менялся, о чем свидетельствовала повторная зондировка на спуске в конце измерений. Одновременно с измерениями турбулентности проводились измерения полной и

жидко-капельной водности с помощью измерителя водности конструкции А.Н. Невзорова [6]. Разработанный ранее метод введения поправок в пульсации температуры позволил рассчитывать истинные значения пульсаций температуры при наличии в облаке жидко-капельной фракции в соответствии с формулой[5]:

$$T'_c = T' + k_w \Delta T^* Lwc, \quad (4)$$

где k_w - коэффициент влияния водности на измеряемую температуру; T' - измеренные пульсации температуры воздуха с учетом динамического нагрева; T'_c - истинные пульсации температуры в облаке с жидко-капельной фракцией; $\Delta T^* = 0,2rM^2T$ - динамический нагрев воздуха за счет торможения потока в датчике температуры; Lwc - мгновенные значения жидко-капельной водности.

Абсолютные среднеквадратические погрешности измерения турбулентных пульсаций скорости и температуры составили [4]: $\delta u' = \pm(\gamma_{u_0} + \gamma_u u')$; $\delta w' = \pm(\gamma_{w_0} + \gamma_w w')$; $\delta T' = \pm(\gamma_{T_0} + \gamma_T T')$, где $\gamma_{u_0} = 0,1 \text{ мс}^{-1}$, $\gamma_{T_0} = 0,02 \text{ К}$ и $\gamma_{w_0} = 0,1 \text{ мс}^{-1}$ - начальные чувствительности пульсаций скорости ветра и температуры; $\gamma_u = 0,07$, $\gamma_w = 0,08$ и $\gamma_T = 0,08$ - среднеквадратические относительные погрешности измерений текущих значений пульсаций u' , w' и T' .

Всего в период с 17 августа по 4 октября 2007 г. над метеополигоном вблизи г. Камагуэй было выполнено 13 полетов, в результате которых было исследовано более 60 конвективных ячеек. Контроль перемещения ячеек проводился с помощью наземного метеорологического радиолокатора. Поскольку турбулентные движения в конвективных облаках крайне неоднородны, для анализа спектральной структуры турбулентных пульсаций и турбулентных потоков в зоне Си было применено вейвлет-преобразование Морле [7], обеспечивающее корректный анализ неоднородных сигналов. По реализациям пульсаций скорости ветра и температуры рассчитывались, в частности, матрицы скалограмм и вейвлет-спектры пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра s_w , температуры воздуха s_T и вейвлет-коспектры потоков тепла $C_{0_{wT}}$. Подробно методика применения вейвлет-анализа для исследования атмосферной турбулентности и турбулентности в облаках описана в справочном пособии [4].

3. Результаты самолетных исследований конвективных облаков тропической зоны

Предварительный анализ спектральной структуры воздушных движений в зоне Си показал, что спектры компонент скорости ветра и температуры и коспектры потоков тепла не являются автомодельными [5], т.е. не могут быть описаны универсальными эмпирическими моделями, что, например, успешно применялось для описания пограничного слоя атмосферы [1]. Вероятно, отсутствие автомодельности объясняется существенной нестационарностью процессов развития кучевых облаков и вытекающей отсюда нелинейностью возможных моделей для описания структуры турбулентности.

Для того чтобы выявить некоторые общие закономерности спектральной структуры турбулентности в зоне Си, рассчитанные для этих зон вейвлет-спектры пульсаций компонент скорости ветра и температуры s_w , s_T и вейвлет-коспектры потоков тепла Co_{wT} были нормированы с помощью дисперсий

σ_w^2 , σ_T^2 , ковариаций cov_{wT} и волновых числа k :

$$\bar{S}_w = \frac{kS_w}{\sigma_w^2}, \bar{S}_T = \frac{kS_T}{\sigma_T^2} \quad (5)$$

$$\bar{C}o_{wT} = \frac{kCov_{wT}}{cov_{wT}}, \quad (6)$$

а волновые числа $\bar{k} = k\lambda_{max}$ нормировались на характерные размеры вихрей λ_{max} , определенные по соответствующим максимумам на спектрах и коспектрах. В том случае, если максимум на спектрах и коспектрах в явном виде не наблюдался, то, следуя методике, применяемой для пограничного слоя атмосферы [1], в качестве λ_{max} использовалось значение λ_0 , соответствующее точке пересечения проэкстраполированного спектра или коспектра из области инерционного интервала в область малых волновых чисел с линией, где значения \bar{S}_w или $\bar{C}o_{wT}$ были равны 1. Отметим, что нормированные коспектры всегда имели участки, где $\bar{C}o_{wT} \sim (k\lambda_m)^{\frac{4}{3}}$, а спектры - $\bar{S}_{w,T} \sim (k\lambda_m)^{\frac{2}{3}}$, что свидетельствовало о существовании в спектрах инерционного интервала.

В результате анализа массивы коспектров потоков тепла были отсортированы по трем группам. Критерием для отбора коспектров в первом приближении послужило относительное время жизни конвективной ячейки $\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0}$, определенное по данным наземного радиолокатора (здесь τ_0 - время

существования ячейки, а τ - момент осуществления измерений, отсчитываемый от первого появления радиоэха от ячейки). При сортировке были исключены случаи, когда самолет проходил во время измерений по краю облака. Поскольку точность определения стадии развития облака была невелика, распределение данных проводилось по диапазонам величины $\bar{\tau}$: для начальной стадии (где $\bar{\tau} \approx 0,25 - 0,40$), стадии максимального развития ячейки ($\bar{\tau} \approx 0,45 - 0,55$) и стадии диссипации ($\bar{\tau} \approx 0,75 - 0,90$). Удалось выделить три различные модели коспектров $\bar{C}_{o_{wT}}$, обозначенные нами как типы коспектров I, II и III, и которые, на наш взгляд, характеризуют три различных стадии развития Си, которые можно было считать квазистационарными. Эти данные представлены на рис.1.

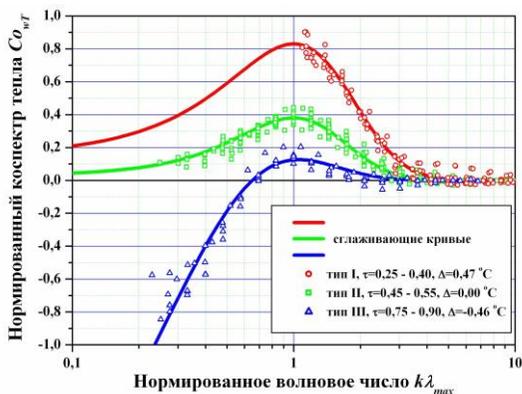


Рис.1. Нормированные вейвлет-коспектры потоков тепла $\bar{C}_{o_{wT}}$ и сглаживающие их функции в зоне Си для различных стадий развития облака.

Известно, что первоначальное образование Си происходит за счет термической неустойчивости в пограничном слое атмосферы и, как следствие, упорядоченного и турбулентного подъема воздушных масс. Далее, процессы конденсации в облаке приводят к выделению дополнительного тепла, которое стимулирует последующее развитие облака и воздушных движений в нем. Мы склонны считать, по крайней мере, часть этой стадии, квазистационарной, и ей соответствует тип I коспектров на рис.1. Коспектры $\bar{C}_{o_{wT}}$ здесь характеризовались величиной λ_{max} от 1050 до 1900 м, т.е. типичный размер вихрей был относительно велик по сравнению с горизонтальными размерами самого облака – 5 – 10 км. Следующая квазистационарная стадия разви-

тия облака обусловлена выделением тепла при кристаллизации облака (тип II коспектров на рис.1).

Значения λ_{max} в этой области находились в пределах от 500 до 900 м, что было близко к типичным размерам турбулентных вихрей в атмосфере. И, наконец, стадия диссипации – тип III коспектров, где величины λ_{max} составляли от 300 до 450 м, что было характерно для чисто турбулентных движений в атмосфере. Отметим, что диссипация облаков происходила на фоне усиленного развития соседних ячеек, по-видимому, за счет перераспределения энергии между ячейками, причем зачастую мощность таких ячеек не позволяла проводить их исследования по соображениям безопасности самолета.

К сожалению, точность определения величины $\bar{\tau}$ была недостаточна для корректной классификации коспектров. Поэтому в качестве критерия был привлечен такой параметр, как степень перегрева облака относительно окружающей его среды [8]. Как оказалось, этот критерий позволил четко разделить коспектры потоков тепла по их типовым формам, соответствующим, на наш взгляд, квазистационарным стадиям развития облака. Так, степень перегрева облака (разность температуры Δ воздуха в облаке с учетом поправки в соответствии с формулой (4) и в окружающем облако воздухе) в диапазоне $\Delta = 0,47 \pm 0,28$ °C четко определяла I тип коспектров, $\Delta = 0,06 \pm 0,07$ °C – II тип, а $\Delta = -0,46 \pm 0,11$ °C – III тип, или стадию диссипации облака.

Аналогичным образом были классифицированы и нормированные спектры пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра и температуры воздуха (рис.2а, б), с той лишь разницей, что для одномерных спектров (которые характеризуют энергию исследуемого сигнала) не обнаружено существенных различий в формах кривых для стадий развития облака с малым перегревом воздуха или с отрицательным ($\Delta < 0,10$ °C).

В то же время, на начальной стадии развития облака, когда перегревы облачного воздуха относительно окружающей среды были велики ($\Delta > 0,35$ °C), спектры пульсаций скорости ветра и температуры воздуха имели существенно иную форму. Отметим также, что спектры пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра характеризовались также и степенью оледенения облака, т.е. отношением жидко-капельной водности к полной водности облака $\frac{Lwc}{Twc}$. Так, для спектров типа I это соотношение составляло 0,65 – 0,90.

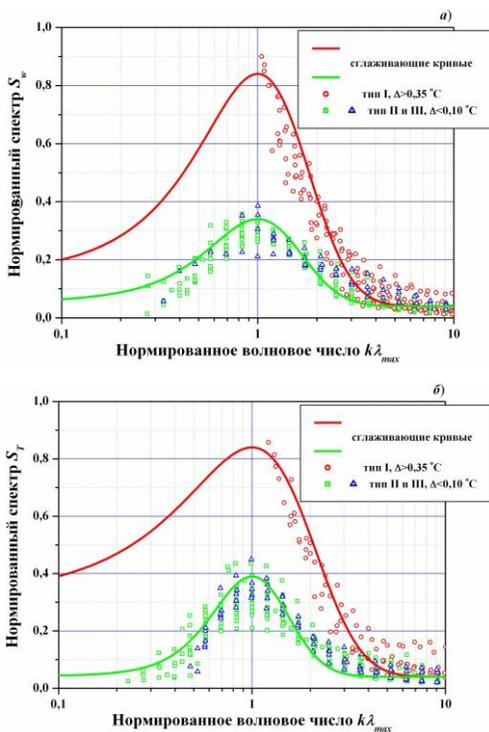


Рис.2. Нормированные вейвлет-спектры пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра \bar{S}_w (а), температуры воздуха \bar{S}_T (б) и сглаживающие их функции в зоне Си для различных стадий развития облака.

Разброс значений коспектров и спектров для каждой выделенной группы (типа) на рис.1,2 не превышал обычного разброса точек на спектрах, полученных различными авторами для пограничного слоя атмосферы[1]. Это обстоятельство позволило сгладить значения коспектров \bar{C}_{o_wT} и спектров \bar{S}_w и \bar{S}_T типа I и II с помощью универсальных функций вида:

$$\Phi(\bar{k}) = A e^{-e^{-z} - z + 1}, \quad (7)$$

где $z = \frac{\bar{k} - 1}{w}$. Параметры сглаживающих функций и приведены в таблице.

Таблица. Параметры сглаживающих функций нормированных спектров и коспектров

Тип спектра	Параметр	Нормированные коспектры $\bar{C}_{O_{WT}}$	Нормированные спектры \bar{S}_w	Нормированные спектры \bar{S}_T
I	A	$0,831 \pm 0,025$	$0,853 \pm 0,025$	$0,812 \pm 0,023$
	w	$0,691 \pm 0,028$	$0,650 \pm 0,029$	$0,850 \pm 0,029$
II, III	A	$0,375 \pm 0,005$	$0,312 \pm 0,008$	$0,351 \pm 0,008$
	w	$0,579 \pm 0,011$	$0,650 \pm 0,007$	$0,452 \pm 0,008$

Для коспектров $\bar{C}_{O_{WT}}$ типа III (имеющих существенную отрицательную часть) сглаживание было проведено с помощью функции:

$$\Psi(\bar{k}) = B [e^{-a_2(\bar{k}-1)} - e^{-a_1(\bar{k}-1)}] \quad (8)$$

где безразмерные коэффициенты $B = 0,92 \pm 0,02$, $a_1 = 3,10 \pm 0,03$ и $a_2 = 2,05 \pm 0,03$. Во всех случаях сглаживание коспектров и спектров было проведено с большой степенью достоверности – коэффициенты корреляции составляли 0,94 - 0,98 с вероятностью отклонения гипотезы 0,0008 – 0,0010.

Оговоримся, что представленные модели спектров и коспектров имеют определенные ограничения. Очевидно, что по соображениям безопасности, самолет не мог входить в очень мощные Cu cong и Cb, что не давало возможность проверить модель для таких облаков. Исследования проводились практически на одной высоте – около 5000 м, при этом мощность конвективных облаков, в которые входил самолет, составляла не более 7 – 8 км, т.е. исследуемые облака можно было охарактеризовать как Cu cong относительно небольшой мощности. Кроме того, помимо представленных в модели случаев наблюдались также и «промежуточные» спектры и коспектры, которые невозможно было отнести ни к одному из представленных на рис.1 типов. Логично было предположить существование некоторых переходных процессов от одного квазистационарного состояния облака к другому. Это было тем более справедливо, поскольку «промежуточных» случаев было относительно немного, несмотря на то, что выбор объектов для исследования проводился практически случайным образом, а сами исследования охватывали довольно продолжительный период времени – от августа до октября.

Заключение

В результате анализа данных о турбулентности в тропических конвективных облаках были выявлены квазистационарные стадии их развития.

Получены универсальные функции, описывающие коспектры потоков тепла и спектры пульсаций скорости ветра и температуры воздуха, определены управляющие параметры (относительное время жизни ячейки и степень перегрева облачного воздуха), параметры универсальных функций, т.е. тем самым предложена модель спектральной структуры турбулентности и турбулентных потоков в конвективных облаках.

Список литературы

1. Атмосферная турбулентность и распространения примесей/Под ред. Ф.Т.М. Ньистадта и Х. Ван Допа. - Л.: Гидрометеоиздат, 1985. - 351 с.
2. Кучевые облака и связанная с ними деформация полей метеозлементов /Под ред. И.П. Мазина и С.М. Шметера // Тр. ЦАО. 1977. Вып. 134. 128с.
3. Струнин М.А. Исследования динамической структуры тропических конвективных облаков. - М.: «Прист» // Мир измерений. 2009. № 7. С. 22-30.
4. Струнин М.А. Научно-методические основы исследования термодинамического состояния атмосферы с борта самолета-метеолаборатории. - М.: «Физматкнига», 2010. - 96 с.
5. Струнин А.М. Влияние водности облака на расчеты спектральных характеристик полей температуры и турбулентных потоков тепла в зоне кучевых облаков по данным самолетных наблюдений//Метеорология и гидрология. 2013. Вып. 7. С. 53 – 64.
6. Korolev A., Strapp J., Issac G., and Nevzorov A. The Nevzorov airborne hot-wire LWC-TWC probe: principle of operation and performance characteristics//J. Atmos. Oceanic Technol. N. 15. P. 2117 – 2151.
7. Kumar P. and Foufoula-Georgiou E. Wavelet analysis in geophysics: An introduction, In: Wavelet in geophysics, Academic Press, Inc., San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto. 1994. P. 1- 43.
8. Sinkevich A.A., Lawson P. A. Survey of Temperature Measurements in Convective Clouds//Journal of Applied Meteorology. 2005. N. 44. P. 1133 –1145.

**СОВРЕМЕННЫЙ КОМПЛЕКС САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ ЯК-42
ДЛЯ ЗАДАЧ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСАДКОВ.
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Б.Г. Данелян, В.В. Петров, Д.В. Кирин

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный

Основной аппаратно-программный комплекс (АПК-5) на самолете лаборатории Як-42Д «Росгидромет» предназначен для задач регулирования осадков, это комплекс для микрофизических исследований облаков и технические средства модификации облаков.

Состав оборудования АПК-5

АПК-5 состоит из приборов для измерения спектральных (спектры размеров облачных частиц в широком диапазоне значений и спектральные характеристики атмосферного аэрозоля) и интегральных характеристик (водность и прозрачность облаков, фазовый состав) облаков. Приборы и датчики с помощью специализированного программного обеспечения бортового информационно-вычислительного комплекса (БИВК) объединяются в единый аппаратно-программный комплекс АПК-5, который производит в реальном масштабе времени вычисления микрофизических параметров облаков и атмосферы, регистрацию полученных данных и их передачу в единый резервированный архив самолета-лаборатории. В состав АПК-5 входят технические средства модификации облаков. Полный перечень состава АПК-5 и измеряемых параметров приведен в табл.1.

1. Комплекс для измерения микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля

Аппаратура для измерения характеристик атмосферного аэрозоля состоит из следующих приборов:

- Счетчик облачных ядер конденсации CCN-200
- Ультра - высокочувствительный спектрометр аэрозоля UHSAS
- Датчик-спектрометр аэрозоля с пассивной полостью PCASP-100X.

Таблица 1. Перечень измерительной аппаратуры и характеристик измеряемых первичных параметров АПК-5.

№	Измеряемый параметр	Измерительное оборудование и системы	Диапазон изменения	Погрешность
1.	Концентрация облачных ядер конденсации	DUAL CCN (CCN200) Счетчик облачных ядер конденсации с двумя колонками	от 0,75 мкм до 10 мкм 2 x 20 каналов	< 10% при концентрации частиц < 10000 см ⁻³
2.	Концентрация и размеры ультрамалых частиц аэрозолей	UHSAS Ultra-High Sensitivity Aerosol Spectrometer Ультра - высокочувствительный спектрометр аэрозолей	от 0,055мкм до 1 мкм; 99 каналов	По размеру частиц 1-5% (в зависимости от формы частиц) По концентрации <5% для размеров частиц >0.065мкм
3.	Концентрация и размеры субмикронных частиц аэрозолей	PCASP-100X Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe Спектрометр аэрозольных частиц с пассивной полостью	от 0,1 до 3 мкм От 20 до 40 каналов (настраивается пользователем)	1- 5% в зависимости от размера частиц
4.	Двумерные изображения частиц и спектры размеров частиц	CIP Cloud Imaging Probe Anti-Shatter Tips CIP Датчик изображений облачных частиц с антиразбрызгивающими накопниками	от 25 мкм до 1550 мкм 64 канала (шаг 25 мкм)	
5.	Двумерные изображения частиц и спектры размеров частиц осадков	PIP: Precipitation Imaging Probe Датчик изображений частиц осадков	от 100 мкм до 6200 мкм 64 канала (шаг 100 мкм)	
6.	Размеры облачных капель	CDP : Cloud Droplet Probe with particle by particle arrival time and with Anti-Shatter Tips	от 2 мкм до 50 мкм от 20 до 40 каналов (настраивается пользователем)	По размеру частиц <5%,
7.	Изображения облачных частиц	CPI- Cloud Particle Imager Датчик формиро-	от 2,3 мкм до 1000 мкм Фотоизображе-	

№	Измеряемый параметр	Измерительное оборудование и системы	Диапазон изменения	Погрешность
		вания изображений облачных частиц. В комплект входит система сбора и обработки данных	ния частиц (частота 50 Гц)	
8.	Спектры размеров частиц	FSSP-100 DMT, Спектрометр облачных частиц	от 2 мкм до 47 мкм 15 каналов	
9.	Водность облаков	ИВО - Измеритель водности облаков		
10.	Прозрачность облаков	РП – Регистратор прозрачности облаков		
11.	Воздействия на облака с помощью пиропатронов	УВ26 Система отстрела пиропатронов калибра 26	Отстрел пиропатронов: одиночно, залп по 2, 3,4,5,6, 7, 8, 15 шт. через 50 мс	
12.	Воздействия на облака с помощью жидкого азота	Генератор мелкодисперсных кристаллов льда ГМЧЛ-А	Расход жидкого азота от 0,5 кг/мин до 10 кг/мин	
13.	Сбор и обработка данных	DAS M300 SEA Inc Система сбора и обработки данных (два моноблока),	Сбор и обработка, регистрация данных аппаратуры АПК5	
		DAS Spec. Inc.	Сбор и обработка, регистрация данных аппаратуры СР1	

Два первых прибора установлены в салоне самолета на 19-ти дюймовые стойки (рис.1). Датчик – спектрометр аэрозоля с пассивной полостью PCASP-100X расположен на пилоне под крылом самолета (рис.2).

2. Комплекс для измерения микрофизических характеристик облаков

Комплекс для измерения микрофизических параметров облаков состоит из:

- Датчика облачных капель CDP;
- Датчика облачных изображений CIP;

- Датчика изображений осадков PIP;
- Датчика изображений облачных частиц CPI;
- Спектрометра облачных частиц FSSP-100.



Рис.1. Состав микрофизического комплекса для измерения атмосферного аэрозоля.



Рис.2. Датчик – спектрометр аэрозоля с пассивной полостью PCASP-100X, установленный на пилоне под крылом самолета.

Приборы установлены на пилонах под крылом самолета, внешний вид самих приборов представлен на рис.3.



Рис.3. Приборы для измерения микрофизических параметров облаков.

3. Технические средства модификации облаков (средства активных воздействий)

Технические средства модификации облаков предназначены для проведения воздействий на облачные системы с помощью кристаллизующих реагентов и хладореагентов.

В состав технических средств входит:

- Устройство выброса пиротехнических изделий ПВ-26;
- Генератор мелкодисперсных частиц льда ГМЧЛ-А.

На рис.5 приведен внешний вид технических средств и их размещения на самолете-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».

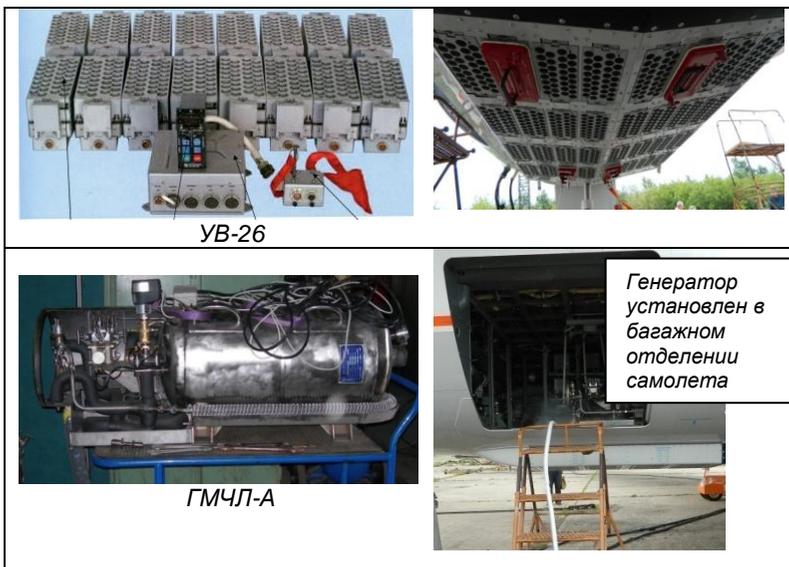


Рис.4. Технические средства модификации и места их расположения на самолете.

4. Предварительные результаты измерений и воздействий.

Измерение облачных ядер конденсации (ОЯК)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ ПО ВЫСОТЕ ПРИ ВЗЛЕТЕ САМОЛЕТА

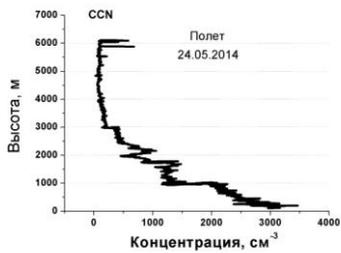
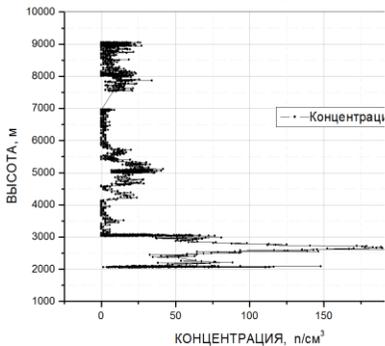


Рис.5. Примеры измерений облачных ядер конденсации (ОЯК).

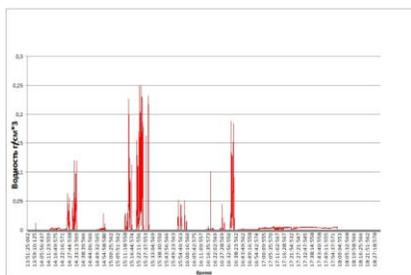


Рис.9. Примеры измерения водности облаков и облачных частиц размерами более 100 мкм.

Опыт по воздействию 9 мая 2014 года

9 мая 2014 года были проведены воздействия на облака внедренной конвекции (рис.10).

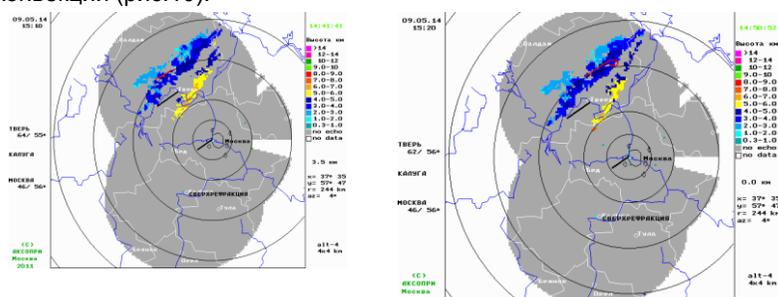


Рис.10. Цифрокарты отражений от облаков в период воздействий (стрелками показана траектория полета самолета).

Воздействие было проведено в период с 15:10 до 15:20 двумя сериями по 15 пиропатронов в каждой серии. В облаках при воздействиях наблюдалось обледенение, измеренная водность составляла $0,25 \text{ г/м}^3$, концентрации крупных частиц были незначительны.

На рис.11 приведен трехмерный график распределений облачных частиц размерами более 100 мкм (левый рисунок) и цифрокарта интенсивности осадков на период воздействий.

Измеренные интенсивности осадков через час после воздействия показали их локальное увеличение, а в суммарном слое осадков за период с 15 до 18 часов явно прослеживается максимум осадков на подветренной стороне от мест воздействия (рис.12, слева - интенсивность осадков в 16 часов 20 мин, справа - суммарный слой осадков)

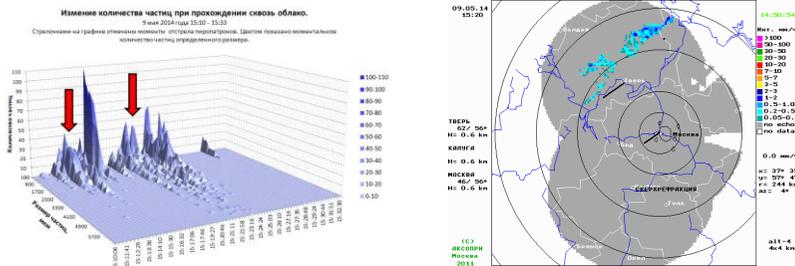


Рис. 11. Распределение крупных облачных частиц (левая часть рисунка, стрелками указаны моменты воздействия) и цифровка интенсивности осадков в 15 часов 20 мин (правая часть рисунка).

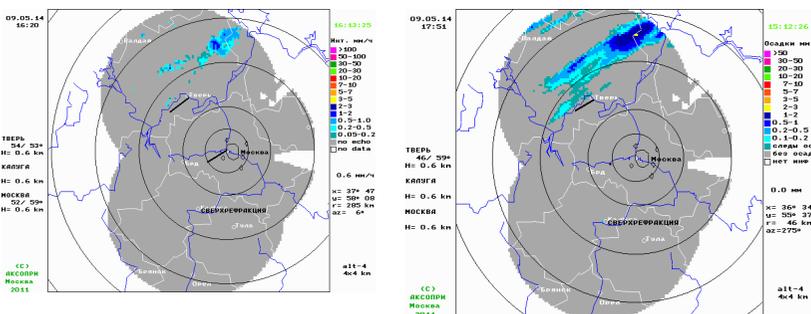


Рис. 12. Цифровки интенсивности осадков в 16 ч. 20 мин. (слева) и суммарного слоя осадков за период с 15 до 18 часов (справа).

Заключение

В настоящее время создана современная летающая платформа на базе самолета Як-42 с уникальным научным оборудованием для проведения широкого спектра научных исследований по разнообразным аспектам физики атмосферы и физики облаков. Технические средства воздействия большой вооруженности (1024 ПВ26) позволят проводить как научные исследования в области активных воздействий, так и производственные работы по регулированию осадков.

**ДОСТОВЕРНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ВЕТРА С
БОРТА САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
ЯК-42Д «РОСГИДРОМЕТ»**

Д.Н. Живоглотов, М.А. Струнин

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный

Введение

Созданный в 2013 г. самолет-лаборатория нового поколения Як-42Д «Росгидромет» начал использоваться для выполнения научных и производственных работ [3]. Для измерения навигационных параметров полета и термодинамических характеристик атмосферы на самолете-лаборатории были установлены навигационные системы, а также датчики давления и температуры, размещенные на подкрыльевой штанге и бортовой обшивке. Ввиду важности ряда параметров (температуры воздуха, статического и полного давлений) их измерения были задублированы. Состав оборудования комплекса и перечень измеряемых параметров приведены в табл.1. Для определения углов атаки и скольжения, измерения полного и статического давления использовались полусферические приемники давления Rosemount типа 858AJ и 858Y. Преобразование давления и температуры воздуха в цифровые сигналы осуществлялось с помощью датчиков давлений Rosemount MADT2016B и блоков интерфейсов датчиков БИД, разработанных в ЦАО. Для измерения температуры точки росы/инея использовался самолетный конденсационный гигрометр СКГ конструкции М.Ю. Мезрина [5].

Таблица 1. Перечень измерительной аппаратуры и характеристики измеряемых первичных параметров

Измерительные приборы	Регистрируемый параметр	Диапазон изменения	Сред. кв. погрешн.
1. Система глобальной навигации GPS-ГЛОНАСС БПСН-2	Широта места <i>Lat</i>	от 80° N до 80° S	0,0003°
	Долгота места <i>Lon</i>	от 180° W до 180° E	0,0003°
	Геометрическая высота полета <i>H_g</i>	от 0 до 10 км	0,01 км
2. Инерциальная навигационная	Угол тангажа <i>θ</i>	от -45° до +45°	0,05°

система Honeywell Laseref VI	Угол крена ϕ	от -90° до $+90^{\circ}$	$0,05^{\circ}$
	Угол курса ψ	от 0 до 360°	$0,2^{\circ}$
	Горизонтальные компоненты путевой скорости W_x и W_y	от -180 до 180 $мс^{-1}$	$0,11$ $мс^{-1}$
	Вертикальная компонента путевой скорости W_z	от -15 до $+15$ $мс^{-1}$	$0,07$ $мс^{-1}$
3. Датчик MADT 2016В на подкрыльевой штанге	Барометрическая высота полета H_{bi1}	от -350 до 10000 м	4 м
	Число Маха M_{i1}	от 0,1 до 0,8	0,0025
4. Блок интерфейсов датчиков БИД на подкрыльевой штанге	Статическое давление p_{i1}	от 250 до 1050 гПа	0,4 гПа
	Динамическое давление q_{i1}	от 0 до 100 гПа	0,2 гПа
	Температура воздуха, высокочастотный датчик температуры ВДТ $T_{iВДТ1}$	от $-70^{\circ}C$ до $+50^{\circ}C$	$0,13^{\circ}C$
	Температура воздуха, датчик температуры Rosemount 102СТ2С $T_{i102СТ1}$	от $-70^{\circ}C$ до $+50^{\circ}C$	$0,29^{\circ}C$
5. Датчик MADT 2016В на правом борту	Барометрическая высота полета H_{bi2}	от -350 до 10000 м	4 м
	Число Маха M_{i2}	от 0,1 до 0,8	0,0007
6. Блок интерфейсов датчиков БИД на правом борту	Температура воздуха, датчик температуры Rosemount 102Е4АL $T_{i102Е2}$	от $-70^{\circ}C$ до $+50^{\circ}C$	$0,29^{\circ}C$
	Температура воздуха, высокочастотный датчик	от $-70^{\circ}C$ до $+50^{\circ}C$	$0,13^{\circ}C$

	температуры ВДТ $T_{iВДТ2}$		
	Температура воздуха, датчик температуры Rosemount 102СТ2СВ $T_{i102СТ2}$	от - 70 °С до + 50 °С	0,29 °С
7. Гигрометр точки росы СКГ	Температура точки росы/инея T_r	от - 70 до +30 °С	0,5 °С

Калибровка датчиков давления и температуры

Датчики давления и температуры были испытаны в лабораторных и полевых (аэродромных) условиях. Датчики MADT были откалиброваны с помощью сертифицированного тестера воздушных сигналов ADTS505, предназначенного для поверки самолетных измерителей воздушной скорости и высоты и имеющего предельную погрешность не более 5 Па. В результате испытаний было определено, что погрешность измерения статического давления составила не более 0,4 гПа, а динамического давления - 0,2 гПа.

Высокочастотные датчики температуры ВДТ градуировались с помощью калибратора температуры АТС125В, имеющего предельную погрешность не более 0,01 °С. В результате испытаний были определены зависимости электрического сопротивления датчиков ВДТ от температуры воздуха, которые обладали высокой линейностью и стабильностью. Среднеквадратическое отклонение измеренных сопротивлений датчиков от теоретических значений составило 0,01 Ом, что соответствовало ошибкам в определении температуры не более чем на 0,03 °С. Шумы в электрических каналах блока БИД, который использовался для преобразования электрического сопротивления датчика в цифровой сигнал, не превышали 0,007 °С. Было показано, что временные изменения градуировочных характеристик датчиков ВДТ находятся в пределах допустимых погрешностей, но для поддержания высокой точности измерений необходима периодическая (не реже 2 раз в год) градуировка датчиков. В качестве предельной погрешности датчика ВДТ было принято значение $\delta T_i = 0,13$ °С.

Аэродинамические поправки в показания датчиков

Подробно методика измерений и расчета навигационных параметров полета и термодинамических параметров атмосферы изложена в методическом пособии [4]. Однако для высокоточных измерений температуры воздуха, скорости и направления ветра было необходимо учитывать аэродинами-

ческие возмущения, вносимые самолетом в набегающий поток. Известно, что полное давление измеряется самолетными приемниками давлений практически без искажений. В то же время различные элементы конструкций самолета и сами приемники давлений могли исказить величину статического давления. Высотные профили полета, построенные по данным датчиков MADT, подключенным к приемникам давлений на подкрыльевой штанге и на правом борту фюзеляжа самолета, показали расхождения, которые определялись только особенностями конструкции приемников давления и местом их размещения на самолете, т.е. локальными аэродинамическими возмущениями потока. Эти расхождения, выявленные на различных высотах и числах Маха полета, позволили считать, что истинные значения барометрической высоты H_b с учетом аэродинамических поправок могут быть определены по формуле:

$$H_b = k_{ha} H_{bi}, \quad (1)$$

а истинные величины статического давления:

$$p = k_{pa} p_i, \quad (2)$$

где H_{bi} и p_i – измеренные бортовым приемником давлений или приемником на подкрыльевой штанге барометрическая высота и статическое давление, соответственно. Согласно результатам сравнений величины поправочных коэффициентов составили: $k_{ha} = 1,024$ и $k_{pa} = 1,025$ для приемника давлений на штанге и $k_{ha} = 0,966$ и $k_{pa} = 0,977$ для бортового приемника давлений. Аэродинамические возмущения на штанге были также оценены и расчетным способом с помощью программы FlowVision [2]. Была построена геометрическая модель штанги, на которой были определены места расположения датчиков температуры и приемных отверстий статического давления, и оценен поправочный коэффициент $k_{pa} = 1,024$, который был близок к величинам коэффициентов, определенным по данным испытательного полета. Было определено и выражение для расчета истинного значения числа Маха M :

$$M = k_M M_{MADT}, \quad (3)$$

где $k_M = 1,085$ для подкрыльевой штанги и $k_M = 0,950$ для бортового датчика. Числа Маха M , рассчитанные в соответствии с формулой (3) по показаниям бортового датчика MADT и датчика на штанге практически совпали на всех высотах.

Сравнение показаний различных датчиков температуры

Истинная температура воздуха $T_{ВДТ}$ по показаниям высокочастотных датчиков температуры ВДТ рассчитывалась в соответствии с известным газодинамическим соотношением [4]:

$$T_{ВДТ} = \frac{T_{iВДТ}}{1 + 0,2rM_i^2}, \quad (4)$$

где $T_{iВДТ}$ - индикаторная (измеренная) температура воздуха по датчикам ВДТ, коэффициент восстановления датчиков ВДТ $r=0,73$ [1], а локальные числа Маха M_i определялись для места расположения соответствующих датчиков. Истинная температура воздуха по показаниям датчиков Rosemount 102СТ2СВ и 102Е4АЛ $T_{102СТ}$ и $T_{102Е4}$ соответственно рассчитывалась по формуле [7]:

$$T_{102} = \frac{T_{i102}}{1 + 0,2M_i^2(1 - \eta)}, \quad (5)$$

где $\eta = \frac{T_0 - T_{i102}}{T_0}$ - коэффициент качества приемника температуры (T_0 - температура торможения потока). Измерения, проведенные на различных высотах и числах Маха, позволили уточнить зависимости $\eta = \eta(M)$ коэффициентов качества термометров Rosemount от числа Маха в виде:

$$\eta = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{M - M_0}{dM}}}, \quad (6)$$

где $A_1 = 1,0000 \pm 0,0001$, $A_2 = 0,9733 \pm 0,0001$, $M_0 = 0,6840 \pm 0,0004$ и $dM = 0,129 \pm 0,0002$.

Результаты сравнения полученных во время испытательного полета самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» 12 ноября 2013 г. показаний пяти датчиков температуры (ВДТ и Rosemount 102СТ2СВ на штанге и ВДТ, Rosemount 102СТ2СВ и Rosemount 102Е4АЛ на борту) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение показаний самолетных датчиков температуры воздуха

$H_b, \text{ м}$	$T_{ВДТ1}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{ВДТ2}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{102СТ1}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{102СТ2}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{102Е2}, \text{ }^\circ\text{C}$
2000	-3,7	-3,5	-3,7	-3,5	-3,1

2880	-7,8	-7,7	-7,7	-7,7	-7,3
5010	-17,4	-17,3	-17,4	-17,2	-16,9
6880	-32,2	-32,0	-32,7	-32,1	-32,0
7960	-40,8	-40,9	-41,1	-41,1	-40,8
8970	-48,0	-48,4	-48,2	-48,3	-48,3

Как следует из таблицы, совпадение показаний всех датчиков и на всех высотах хорошее, расхождение не выходит за пределы погрешностей датчиков. Важно, что практически совпали показания датчиков температуры различных типов, с различным расположением на самолете-лаборатории, что свидетельствует в пользу достоверности самолетных измерений температуры. В дальнейшем для расчетов термодинамических характеристик использовались показания датчика температуры ВДТ, расположенного на штанге.

Расчет скорости и направления ветра

В соответствии с методикой, изложенной в справочном пособии [4] производились расчеты истинной воздушной скорости полета самолета U в мс^{-1} :

$$U = 20,04 M \sqrt{T_{ВДТ}} \quad (7)$$

путевой скорости самолета W в мс^{-1} :

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (8)$$

скорости ветра V в мс^{-1} :

$$V = \sqrt{(W_x - U \sin \psi)^2 + (W_y - U \cos \psi)^2} \quad (9)$$

угла ветра φ в диапазоне $\pm 180^\circ$:

$$\varphi = 57,3 \arctg \frac{V_y}{V_x} \quad (10)$$

Результаты сравнения профилей температуры воздуха, температуры точки росы/инейя, скорости и направления ветра, определенных по данным утреннего (взлет в 04 ч 18 мин) полета самолета-лаборатории в рамках работ по метеозащите г. Москва 9 мая 2014 г. в районе Волоколамска и результатам радиозондирования (04 ч 00 мин) в г. Долгопрудный представлены на рис.1. Как видно из рисунка, вертикальные профили температуры воздуха практически совпали. Близки оказались и профили скорости и направления ветра, определенные по самолетным данным и результатам радиозондиро-

вания. На высотах от 1950 м до 4400 м наблюдался сухой слой воздуха с относительной влажностью около 30%.

Кроме того, в этом слое сухого воздуха был обнаружен на высоте 2140 м тонкий до (50м) подслой очень сухого воздуха с относительной влажностью около 8%. Отметим, что данные радиозондирования не позволяли обнаружить этой слой. Выше, на высотах от 4800 м до 6250 м, отмечен слой более влажного воздуха с относительной влажностью от 65 до 97%. На высоте 7160 м, где наблюдались облака типа As, был выделен тонкий слой мощностью не более 50 м с влажностью близкой к 100%. Из представленных данных можно сделать заключение о достоверности работы измерительной системы Як-42Д «Росгидромет» в части определения основных метеорологических параметров атмосферы.

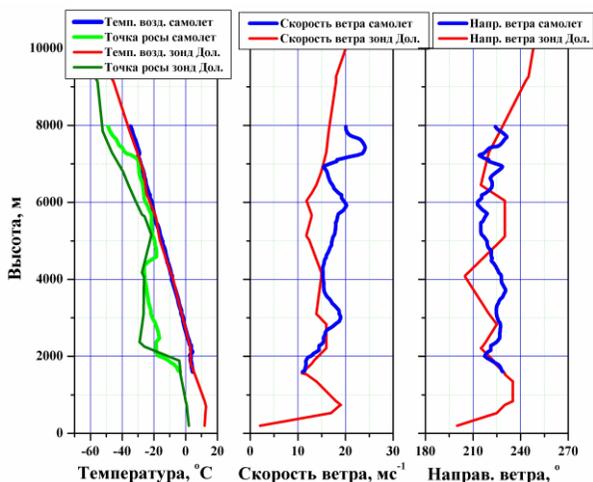


Рис.1. Сравнение показаний данных самолетной измерительной системы и радиозондирования

Влияние водности облака на показания датчиков температуры

Все самолетные датчики, измеряющие температуру воздуха контактным способом, подвержены влиянию облачных капель. Оценка степени влияния облачных капель на датчики температуры проводилась в специальной аэродинамической установке САУ, для чего была создана система впрыска капель для создания воздушного потока с жидко-капельной фракцией, имитирующей кучевое облако [2]. Пример реакции датчика на попадание на него капель представлен на рис.2а, где приведен ход (реализация) температуры

воздуха в рабочей камере САУ, измеренный с помощью датчика ВДТ до впрыска капель, во время впрыска и после него. Вводя понятие о коэффициенте поправки температуры на водность облака k_w , можно рассчитать саму поправку в температуру ΔT в виде:

$$\Delta T = k_w \Delta T^* Lwc, \quad (11)$$

где $\Delta T^* = 0,2rM^2T$ - динамический нагрев воздуха за счет торможения потока в датчике температуры, а Lwc - мгновенные значения жидко-капельной водности. Ряд экспериментов с помощью САУ, позволил построить кривые зависимости поправки в измеряемую температуру от величины параметра $\Delta T^* Lwc$ (см. рис.2б) и оценить величины для различных условий.

Отметим, что влияние изменения теплофизических свойств капель в потоке оценивалось в экспериментах при различной температуре впрыскиваемой воды – от +25 до +60 °С и при различных уровнях влажности в помещении САУ (от 40% до почти 100% относительной влажности воздуха). Существенного влияния эти факторы на результаты не оказали.

Эксперименты были проведены для жидко-капельных фракций в воздушном потоке с двумя типами спектров. Первый тип (синие точки на графике), когда основная масса капель имеет размеры от 20 до 40 мкм, что характерно для морских тропических конвективных облаков. Второй тип (красные точки на графике) – каплями с размером от 5 до 20 мкм, когда распределение капель в потоке рабочей камеры было близко к микроструктуре капельных кучево-дождевых облаков средней полосы.

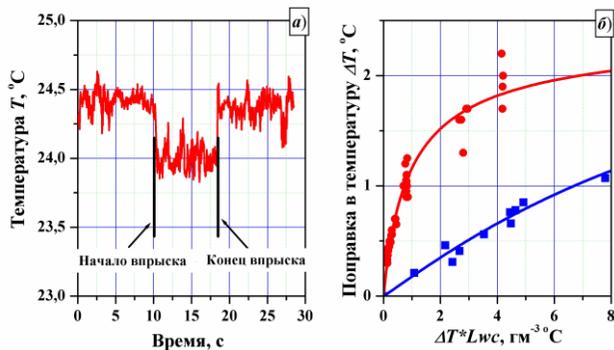


Рис.2. Определение влияния капель на показания датчика температуры ВДТ: а) – скачок температуры за счет впрыска капель, б) – зависимость поправки в температуру от степени нагрева и водности для двух типов спектров капель.

Результаты экспериментов представлены на рис.2б. Как видно из рисунка, степень влияния влажности на показания датчика температуры существенно зависит от спектров размеров капель. Так для тропических облаков (синие точки на рис.2б) можно использовать линейное приближение со значением коэффициента $k_w = 0,17 \pm 0,02 \text{ м}^3 \text{ г}^{-1}$. Для умеренных широт уместнее использовать либо нелинейную зависимость, либо аппроксимацию с двумя коэффициентами ($k_w = 1,45$ и $k_w = 0,30 \text{ м}^3 \text{ г}^{-1}$) для различных диапазонов величин $\Delta T^* Lwc$.

Заключение

Проведенные лабораторные исследования и летные эксперименты позволили оценить степень достоверности измерения температуры, скорости и направления ветра с борта самолета-лаборатории. Определены аэродинамические поправки, которые обеспечили существенное повышение точности проводимых измерений. Определена степень влияния облачных капель на показания датчиков температуры для различных типов облаков.

Список литературы

1. Дмитриев В.К., Струнин М.А., Шур Г.Н. Определение постоянных времени самолетных датчиков температуры и компонент скорости ветра // Метрология. 1987. № 8. С. 38-42.
2. Живоглотов Д.Н. Оценка влияния влажности на измерения температуры воздуха в облаках по результатам исследований в аэродинамической установке // Метеорология и гидрология. 2013. № 8. С. 29-39.
3. Официальный пресс-релиз Росгидромета от 13 мая 2014 г. «Первое применение самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» для выполнения работ по метеозащите г. Москвы», <http://meteofr/press/release/7346/>, пресс-служба Росгидромета.
4. Струнин М.А. Научно-методические основы исследования термодинамического состояния атмосферы с борта самолета-метеолаборатории. - М.: Физматкнига, 2010. - 96 с.
5. Mezrin M. Yu., Starokoltsev E.V., Fujiyoshi Y., Yoshizaki M. Contribution of different scales to integral moisture transport based on aircraft observations over the Sea of Japan//Atmosph. Research. 2003. N. 69. P. 109-124.
6. Micro Inertial Reference System Laseref VI. Product Description. - Honeywell, 2012. - 33 p.

7. Total Temperature Sensors//Technical Report. 1994. N. 5755. - Revision C. - 30 p.

САМОЛЕТ-ЛАБОРАТОРИЯ ЯК-42 «РОСГИДРОМЕТ» КАК СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ И ОБЛАКОВ

Ю.П. Михайловский, Б.Г. Зайнетдинов, И.Б. Попов, А.А. Синькевич
ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

Введение

Самолет-лаборатория ЯК-42 «Росгидромет» оборудован уникальным комплексом аппаратуры для исследований атмосферы, облаков и подстилающей поверхности. Составной частью этого комплекса является аппаратно-программный комплекс (АПК-7) для измерения атмосферно-электрических характеристик (АЭХ), а именно: электрических полей (градиента потенциала или напряженности электрического поля E) и полярных электрических проводимостей (L^+ и L^-). АПК-7 включает в себя 6 самолетных приборов для измерения E (СПНП), прибор для измерения L^+ и L^- (СИ-ЭВ) и активный компенсатор заряда самолета (АКЗС), позволяющий целенаправленно менять заряд самолета. Система 6 датчиков СПНП позволяет определить полный вектор электрического поля, собственный заряд самолета-лаборатории и оценить погрешности измерений E .

Эти измерения могут использоваться для:

- мониторинга электрического поля Земли. Пространственно-временное распределение этих характеристик характеризует т.н. «электрический климат» регионов и Земли в целом. Вертикальное зондирование АЭХ с помощью самолета-лаборатории позволит проводить оценки параметров глобальной атмосферно-электрической цепи (ГАЭЦ) – потенциала ионосферы и вертикального тока земля – ионосфера и, следовательно, проводить мониторинг этих параметров. Регулярные наблюдения позволят отслеживать как глобальные, так и локальные тренды во времени и пространстве возмущения;
- мониторинга аэрозольного, в том числе радиоактивного загрязнения атмосферы и поверхности. АЭХ, особенно электропроводность воздуха, являются мощным косвенным предиктором аэрозольного и радиоактивного

загрязнения атмосферы. Имеется серия статей советских и зарубежных ученых о влиянии ядерных испытаний на земле и в атмосфере, Чернобыльской катастрофы и аэрозольного загрязнения в больших городах (С.-Петербург) на АЭХ, измеряемые наземными средствами. Мониторинг АЭХ может использоваться как для мониторинга аэрозольного и радиоактивного загрязнения отдельных пунктов и территорий, так и для обнаружения, картографирования и отслеживания перемещения и распространения загрязненных областей в оперативном режиме;

- обнаружения заряженных объектов или областей в атмосфере и на земле;

- разработки методов прогнозирования землетрясений и извержений вулканов по характеристикам электрического поля;

- контроля электрического состояния облаков, в том числе при активных воздействиях и других целей. Процессы облако- и осадкообразования неразрывно связаны с процессами электризации как отдельных частиц, так и всего облака в целом. Огромная роль электрических сил и зарядов в процессах роста частиц и перемещения их в облаке общепризнанна. Объективный инструментальный контроль электрического состояния облака с помощью самолета, оборудованного аппаратно-программным комплексом для измерения АЭХ, позволит существенно повысить качество информации о процессах в облаке как при его естественном развитии, так и при воздействиях. Огромным преимуществом этого комплекса является возможность его дистанционного использования, т.е. без захода в мощные кучево-дождевые и даже грозовые облака [4].

В 1979 году было оборудовано новое поколение самолетов-метеолабораторий (СМЛ) «Циклон» АН-12 и ИЛ-18. Первый опыт эксплуатации этих СМЛ заставил заново вернуться к вопросам точности измерения E . Так как самолеты имели очень большой собственный заряд в чистой («свободной») атмосфере, создававший на фюзеляже E_q до 10000 В/м, и наблюдались существенные различия между реальными K и модельными, погрешности измерения более чем в 100 раз превышали погрешности для ИЛ-14 [3,5,8]. Была разработана новая методика измерений E для этих самолетов-лабораторий, которая позволила компенсировать собственный заряд самолета и уточнить матрицу коэффициентов формы для конкретного самолета – лаборатории [3,5]. Полученные результаты позволили успешно использовать ИЛ-18 «Взлет» для зондировок электрического поля в Арктике и другие самолеты, оборудованные по программе «Циклон», для исследований электризации конвективных облаков в естественном цикле

развития и при воздействиях, начиная с самых ранних стадий развития конвективных облаков[4,14].

Приборы и методика

На основе имеющегося опыта предыдущих разработок были созданы новые самолетные средства измерений E и L [2]. Разработка была осуществлена на базе созданных ранее и прошедших длительную проверку на самолетах «Циклон» образцов СПНП, СИЭВ и АКЗС. Была проведена существенная модернизация как в части конструктивных решений, так и в разработке современного цифрового интерфейса и использовании современной микроэлектроники. Разработанные образцы успешно прошли лабораторные испытания и сертификацию. СПНП имеет переключаемый предел измерений в зависимости от решаемых задач – 20000 или 200000 В/м, предел измерения каждого канала СИЭВ составляет 200 фСм/м.

Методика самолетных измерений электропроводности атмосферы

Методические погрешности измерений электропроводности атмосферы могут быть обусловлены влиянием электрического поля самолета на концентрацию легких ионов соответствующего знака в месте установки датчика СИЭВ. Электрическое поле самолета создается собственным зарядом самолета и индуцированным зарядом во внешнем электрическом поле.

Методика самолетных измерений напряженности электрического поля в атмосфере

Измерения E в атмосфере с помощью самолетов, как уже упоминалось, представляют собой достаточно сложную проблему. В качестве доказательства можно привести перечень работ американских исследователей, занимающихся исследованиями в области атмосферного электричества[6,7, 9-13]. Сложность обусловлена существенным искажением поля атмосферы носителями датчиков. Имеются два искажающих фактора: сам самолет, как металлическое тело сложной формы, и собственный заряд самолета.

Для случая эквипотенциальной поверхности фюзеляжа (металлический самолет без диэлектрических элементов и покрытий) и однородного электрического поля задача имеет решение. Измерения в «чистой» атмосфере вне облаков, осадков и другого аэрозоля при разумном размещении датчиков СПНП могут считаться удовлетворяющими этим допущениям.

В этом случае электрическое поле E , измеренное i -м датчиком, можно представить

$$E_{iS} = f_i(k_{ix}, k_{iy}, k_{iz}, k_{iq}, E_x, E_y, E_z, Q), \quad (1)$$

или в матричной форме:

$$\mathbf{E}_S = \mathbf{K} \mathbf{E}_{EQ}, \quad (2)$$

где $\mathbf{E}_{EQ} = (E_x, E_y, E_z, Q)$; E_x, E_y, E_z - ортогональные компоненты измеряемого вектора \mathbf{E} в системе координат самолета; Q - собственный заряд самолета, создающий на фюзеляже в точке i напряженность $E_{iQ} = Q k_{iQ}$; $k_{ix}, k_{iy}, k_{iz}, k_{iQ}$ - коэффициенты формы для i -го датчика.

Решая (2) относительно \mathbf{E}_{EQ} ($i = 1, 2, 3, 4$) получим:

$$\mathbf{E}_{EQ} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{E}_S, \quad (3)$$

или, для $i=1, \dots, n$ и $j = x, y, z, q$:

$$E_{jEQ} = F_j (k_{1j}, k_{nj}, E_{1S}, \dots, E_{nS}), \quad (4)$$

абсолютная ошибка:

$$\begin{aligned} & (dE_{jEQ})^2 \\ &= (dF_j/dK_{1j})^2 (dK_{1j})^2 + (dF_j/dK_{nj})^2 (dK_{nj})^2 + (dF_j/dE_{1s})^2 (dE_{1s})^2 + (dF_j/dE_{ns})^2 (dE_{ns})^2, \end{aligned} \quad (5)$$

Анализируя (5), можно наметить основные пути уменьшения dE_{EQ} , а именно:

1) уменьшение количества слагаемых в (5) при размещении датчиков на электрических нейтралях или на их пересечениях, при этом соответствующие dF_j/dK_{ij} и dF_j/dE_{is} будут равны нулю;

2) размещение датчиков в точках минимальных значений dF_j/dK_{ij} и dF_j/dE_{is} ;

3) уменьшение погрешностей самих коэффициентов формы dK_{ij} ;

4) уменьшение ошибок каждого датчика dE_{is} .

Уменьшение dE_{EQ} путем оптимального расположения датчиков

Как показывает наш опыт, первые два пути уменьшения dE_{EQ} и снижения ошибок чрезвычайно важны и эффективны. Однако существует множество различных дополнительных ограничений на размещение датчиков \mathbf{E} на корпусе, например, близость топливных баков, рулевых тяг и пр., которые зачастую заставляют нас выбирать между плохим и очень плохим вариантом. Это особенно актуально для современных самолетов-лабораторий (СМЛ), чрезвычайно насыщенных датчиками и антеннами. Определение в таких условиях квазиоптимального расположения датчиков требует определенного опыта. Хотя из общих соображений ясно, что значения dF_j/dk_{ij} и dF_j/dE_{is} максимальны вблизи острий и малых радиусов. Следовательно, размещать датчики следует на плоских частях фюзеляжа, таких, например, как верх центроплана для АН-12 и низ для ИЛ-18. А там как раз находятся бензобаки. Для детального исследования вопроса о распределении значений dF_j/dk_{ij} и dF_j/dE_{is} по фюзеляжу можно использовать модельные измере-

ния в плоском конденсаторе или расчетные методы. Хороший эффект может дать использование избыточного количества датчиков. Значение E_{EQ} определяется из условия минимизации:

$$k = S (E_{is} - f_i(\mathbf{K}, E_{EQ}))^2 \quad (6)$$

Уменьшение dE_{EQ} путем снижения погрешностей определения коэффициентов формы K_{ij}

Исследования последних лет демонстрируют большие резервы снижения dE_{EQ} за счет повышения точности определения матрицы \mathbf{K} [5]. Но даже современные экспериментальные и теоретические методы определения \mathbf{K} [6,7, 9-13] не могут, на наш взгляд, дать требуемой точности, т.к. имеется существенная разница между моделью и СМЛ в полете.

Эта разница обусловлена наличием высокоионизованных струй от двигателей и других источников, которые изменяют эквивалентную электрическую форму и емкость СМЛ и также сложностью моделирования различных антенн и обтекателей, включая обтекатели датчиков E . Показательны результаты [9]: для СМЛ "Leag jet 36A" разница теоретических и практических коэффициентов составляла 40%. Мы для некоторых \mathbf{K} получали ошибки более 100%. Для решения этой проблемы нами были разработаны методики определения (или уточнения) матрицы \mathbf{K} в результате проведения специальных полетов [3,4]. Этими полетами мы задаем априорную информацию о E_{EQ} (значения или связи между компонентами). Получив показания датчиков E_s , мы решаем (2) и (3) относительно \mathbf{K} .

Измерения электрического поля в облаках и других аэрозолях

Как следует из общих физических соображений и подтверждено нашим опытом, в общем случае измерения E внутри облаков и аэрозолей некорректны, т.к. могут нарушаться основные допущения, на которых базируется используемая в настоящее время методика измерений – эквипотенциальность корпуса СМЛ и однородность внешнего поля. Сильное заряджение различных диэлектрических обтекателей на фюзеляже потоками аэрозольных частиц может приводить к таким разностям потенциалов фюзеляжа и обтекателя, что возникают явления коронирования и искрового пробоя [1]. Кроме этого, к нарушению эквипотенциальности может приводить также обледенение фюзеляжа и металлических обтекателей, в частности, обтекателей датчиков E .

Масштабы системы датчиков E на самолете (десяtkи метров) могут оказаться сравнимы с масштабами неоднородностей зарядов в облаке, что

приводит к неоднородности поля. Кроме этой «естественной» неоднородности E , весьма вероятно появление «искусственных» неоднородностей, вызванных облачными или аэрозольными частицами, сильно заряженными при столкновении с фюзеляжем СМЛ или обтекателями и пролетающими в непосредственной близости от датчиков. В этих условиях погрешности измерений E зависят от большого количества факторов: стадии жизни облака, агрегатного состояния частиц (жидкие, кристаллические, переохлажденные), температуры в месте измерения и состояния поверхности СМЛ, взаиморасположения датчиков и других обтекателей, положения закрылков и рулей высоты и множества других трудно учитываемых факторов и могут меняться от приемлемых (при измерениях в теплых или, наоборот, чисто кристаллических облаках и при использовании СМЛ, оборудованных специально для измерений E) до неприемлемых, вплоть до неправильного определения знака (при полетах в условиях обледенения в развитых в электрическом смысле облаках и с использованием универсальных СМЛ с наличием всех недостатков, отмеченных выше). В последнем случае за изменения E могут быть приняты изменения в условиях обтекания самолета в зависимости от угла тангажа или изменения заряжения самолета, отдельных его частей и столкнувшегося с ним аэрозоля, в зависимости от температуры, размеров и фазового состояния частиц и другие причины.

Токи, заряжающие СМЛ в облаках, могут быть в 1000 и более раз выше, чем вне облаков [1]. В этих условиях используемые нами высоковольтные разрядники неэффективны. В общем, измерения E в облаках - это чрезвычайно сложная задача, требующая участия специалиста, начиная с этапа оборудования СМЛ. И хотя самые общие требования можно сформулировать, такие как правильное расположение датчиков в отдалении от диэлектрических обтекателей и вне зон действия «искусственных» объемных зарядов, уменьшение базы расположения датчиков и др., их практическая реализация зачастую трудновыполнима.

Предварительные результаты испытаний АПК-7 и рекомендации

К сожалению, выполнить весь комплекс испытаний, включая методические режимы для определения полной матрицы коэффициентов, по многочисленным организационным, техническим и финансовым причинам не удалось. Но некоторые предварительные результаты можно представить.

Размещение шести датчиков СПНП и датчика СИЭВ на фюзеляже представлено на рис.2. Четыре датчика СПНП и датчик СИЭВ размещены в передней части фюзеляжа (верхний, нижний, правый, левый), два датчика СПНП - в задней (верхний, нижний). Датчики СИЭВ размещены в передней части справа. Острия АКЗС размещены в задней части снизу. Структурно

схема размещения выглядит неплохо. Но, как и отмечалось выше, перенасыщенность самолета измерительной техникой плюс замена типа самолета практически в конце работ по теме, привели к тому, что большинство датчиков СПНП оказалось вблизи диэлектрических обтекателей и блистеров (рис.2,3). Для получения допустимых погрешностей при внутриоблачных измерениях необходима металлизация, по крайней мере, лобовых поверхностей диэлектрических обтекателей. Для измерений в безоблачной атмосфере расположение датчиков также может влиять на точность измерений за счет длительного времени выравнивания потенциалов фюзеляжа и обтекателей. Требуется проведение специальных исследований.

Как уже отмечалось, предоставление статьи было задержано в надежде обработки и анализа прошедших полетов. На сегодняшний день мы имеем самые предварительные результаты. Остается надеяться, что нам удастся представить более полные и обоснованные выводы не только о качестве работы АПК-7, но и научные результаты, полученные в первых полетах.

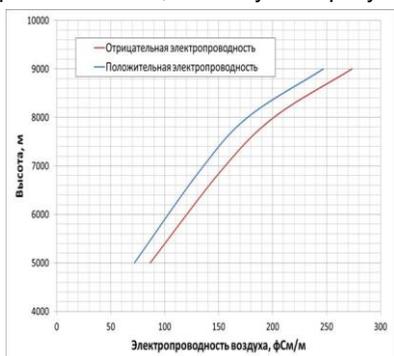


Рис. 1. Изменение L+ L- с высотой.



Рис. 2. Размещение датчиков СПНП на фюзеляже ЯК-42 «Росгидромет».



Рис.3. Размещение датчиков СПНП и других обтекателей и антенн.

Минимальное количество проблем наблюдается с измерениями L. На рис.1 представлено изменение полярных проводимостей с высотой от 5 до 9 км. Видно, что значения достигают 250 фСм/м при заявленном диапазоне 200 фСм/м. Возможно потребуется расширение диапазона как для измерений на больших высотах, так и для исследований особенностей распределения L вблизи вершин грозových облаков, расположенных приблизительно на этих высотах. На малых высотах наблюдается существенный «разрыв» значений L, в причинах которого разобраться пока не удалось.

Предварительный анализ измерений E показал, что не все датчики работают в штатном режиме. Из показаний работающих датчиков следует, что уровень заряжения самолета ЯК-42 относительно мал по сравнению с самолетами ИЛ-18 и АН-12, что обусловлено различием используемых двигателей. На рис.4 представлено изменение показаний верхнего и правого носовых датчиков СПНП при изменениях заряда самолета, связанных с изменением тяги двигателей. Видно, что наблюдаются синхронные изменения показаний датчиков, что и должно иметь место при приблизительно одинаковых коэффициентах формы у этих датчиков. Результаты испытаний АКЗС пока не получено.

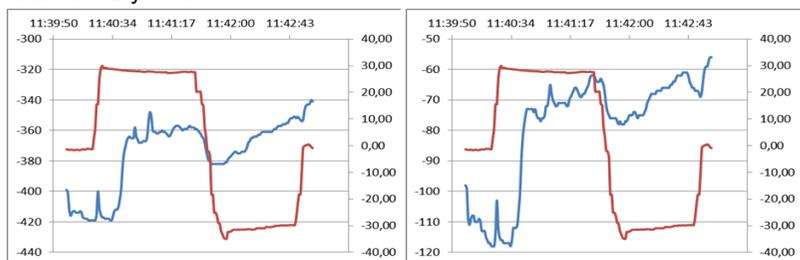


Рис.4. Изменения E носового верхнего (слева) и носового правого (справа) датчиков СПНП при маневрах с креном.

Список литературы

1. Имянитов И.М. Электризация самолетов в облаках и осадках. - Л.: ГМИ, 1976. - 385 с.
2. Климин Н.Н., Попов И.Б. О результатах выполнения в Главной геофизической обсерватории работ по модернизации аппаратуры для исследования электрического состояния атмосферы // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству, Санкт-Петербург. Сборник трудов. 2012. Т.2. С.18-20.

3. Михайловский Ю.П., Белов Б.А., Евтеев Б.Ф. О точности измерений напряженности электрического поля и заряда самолета//Проблемы атм. электричества. – Л.: ГМИ, 1990. С. 138-146.
4. Михайловский Ю.П., Кашлева Л.В. Методика и результаты исследований электризации конвективных облаков с помощью самолетов//Сборник трудов ГГО «Радиолокационная метеорология и активные воздействия». - СПб.: ГГО, 2012. С.98-114.
5. Михайловский Ю.П. О технологии контроля напряженности электрического поля атмосферы и облаков с помощью самолетов-лабораторий // Методы и устройства передачи и обработки информации, ISSN 2220-2609. - Муром, 2014. № 16. С.41-45.
6. Anderson R.V. and Bailey J.C. Experimental calibrations of an aircraft vector electric field meter system, Int. Aerosp. Ground Conf., 33.1-33.13, 1986.
7. Easterbrook C.C., Rudolph T.H. and Easterbrook K. Estimating electric field enhancement factors in aircraft utilizing a small scale model: A method evaluation, Int. Aerosp. Ground Conf. 1988.PP. 171-174,
8. Evteev B., Michalowski Yu. On methodical treatments in measuring the electric field by aircraft. - Proc. 9th ICAE. - St. Petersburg, 1992. - P.150-153.
9. Giori K.L., Nanevicz J.E. and Baron M.J. Comparison of the electrical charging and discharging environments of multiple aircraft-borne electric field measurement system, paper presented at the International Conference on Lightning and Static Electricity, Atlantic City, N.J., 1992.
10. Hewitt K., Kositsky J., Maffione R. and Thayer T. On the accuracy of an aircraft-borne ambient electric field measuring system, paper presented at the International Conference on Lightning and Static Electricity, pp. 7A.1.1-7A.1.8, Univ.of Bath., Bath, England, 1989.
11. Jones J. Electrical emissions of airplanes flying in electrified clouds and their effect on airplane measurements of cloud electric field, paper presented at the International Conference on Lightning and Static Electricity, Cocoa Beach, Fla, April 16-19, 1991.
12. Kositsky J., Nanevicz J.E. Scale-model charge-transfer technique for measuring enhancement factors, presented at the International Conference on Lightning and Static Electricity, Cocoa Beach, Fla, April 16-19, 1991.
13. Mazur V., Ruhnke L., Rudolph T. and Perala R.A. Effect of E-field mill location on the accuracy of electric field measurements with airplane. Int. Aerosp. and Ground Conf. 1986. PP. 31.1-31.7,
14. Mikhailovsky, Yu.P., L.V.Kashleva and V.D.Stepanenko. Aircraft investigation of the convective clouds electrification. Proc. of the 9th Conf. of the Atm. Electricity, St. Petersburg, Russia. 1992. P. 193-197.

БОРТОВОЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ, ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С БОРТА САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ЯК-42Д «РОСГИДРОМЕТ»

Н.В. Базанин, В.В. Волков, В.В. Петров

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный

Современные самолеты-лаборатории позволяют синхронно измерять и регистрировать, сотни параметров атмосферы, облаков и подстилающей поверхности, а также передавать их в реальном масштабе времени в наземные центры управления экспериментом. Обработка больших массивов информации во время полета невозможна без специально разработанных бортовых информационно-вычислительных комплексов (БИВК), основной задачей которых является создание аппаратно-программной среды, обеспечивающей совместную работу всей научной измерительной аппаратуры, и объединение разнородной научно-технической информации в единую структуру для дальнейшей обработки и анализа.

Согласно техническому заданию на создание самолета-лаборатории, оснащенного оборудованием и приборами геофизического мониторинга, в состав оборудования должно входить более 70 различных измерительных приборов, имеющих различные интерфейсы и различную скорость регистрации данных. Данные измерений должны быть привязаны по времени для того, чтобы в дальнейшем было возможно проводить комплексный анализ полученного материала и сравнение с данными других измерений.

При разработке БИВК для самолета – лаборатории Як-42Д учтен опыт создания систем сбора данных на зарубежных самолетах-лабораториях, а также последние достижения в области информационных технологий.

Измерительная аппаратура, установленная на самолете Як-42Д в соответствии с видом измеряемых параметров, функционально объединяется в семь аппаратно-программных комплексов (АПК): термодинамический, аэрозольных и микрофизических измерений, измерений химического состава газов в атмосфере, измерения радиационных потоков в атмосфере, измерения электрических параметров атмосферы и т.д. Измерительные приборы подключаются к компьютерам системы сбора данных с помощью стандартных интерфейсов: последовательные порты (RS 232/422/485), аналоговые каналы, счетные каналы (количество импульсов за единицу времени), ARINC429, Ethernet, а так же специальные высокоскоростные порты для пе-

- подготовка данных и отправка их в «Бортовой архив» - центральную базу данных, находящуюся на сервере самолета;
- самодиагностика.

Сервер «Бортового архива» решает задачи:

- прием данных со всех АПК и их контроль;
- объединение принятых данных в бортовой архив в едином формате;
- контроль качества данных по заданным критериям;
- обеспечение резервирования архива (зеркало);
- подготовка данных для отображения на АПК;
- подготовка данных для переноса в наземный архив;
- внутренний контроль и самодиагностика.

Для создания БИВК выбрано оборудование, обеспечивающее максимальную производительность и вычислительную мощность с сохранением надежности и взаимозаменяемости применяемых компонентов системы.

Состав оборудования БИВК самолета-лаборатории. Системы передачи данных. Спутниковая самолетная система передачи данных

Для обеспечения оперативной передачи данных самолетного эксперимента в наземный центр данных из любых географических районов, а также для организации сеансов голосовой связи и обмена текстовыми сообщениями, на самолет устанавливается бортовая система спутниковой связи, хорошо зарекомендовавшая себя на зарубежных самолетах-лабораториях, система спутниковой связи Inmarsat TT Aero-SB LITE TELEMAR AIRCALL, которая обеспечивает как телефонную связь, так и передачу данных со скоростью до 256кбит/сек на всей территории земного шара от 75°ю.ш. до 75° с.ш.

Система передачи данных по радиоканалу

На самолете установлена разработанная по техническому заданию АНО «Агентство атмосферных технологий» система радиообмена данными, работающая в авиационном УКВ диапазоне частот (118–137 МГц) и позволяющая передавать навигационные параметры полета и данные измерений параметров атмосферы и облаков на наземный пункт управления, отображать в реальном масштабе времени траектории полета самолетов на географических и радиолокационных картах распределения облаков и осадков на бортовых мониторах и мониторах наземного пункта управления, передавать на борт самолетов радиолокационные карты распределения облаков и осадков, вести голосовую связь и производить обмен текстовыми сообщениями между наземным пунктом управления и бортовым оператором самолета. Система радиообмена обеспечивает контроль за проведением локального

самолетного эксперимента в радиусе до 300км от центра управления работами. В состав Комплекса входят наземный и бортовой комплекты оборудования. Общая структурная схема Комплекса показана на рис.2.

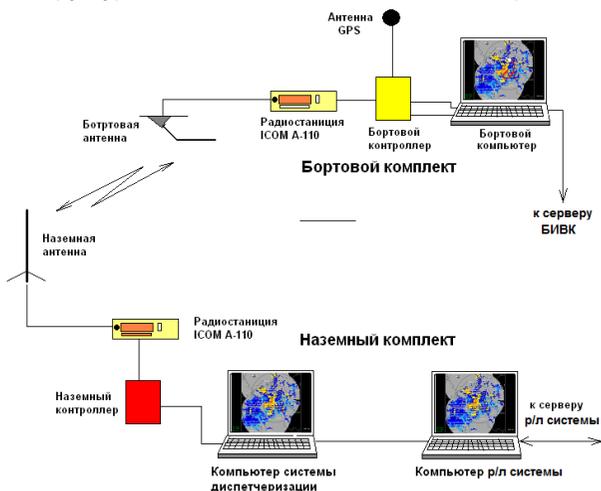


Рис.2. Общая структурная схема системы радиообмена данными.

В состав бортового комплекта Комплекса входит бортовой навигационный контроллер с GPS приемником и самолетной GPS антенной «Antcom 4G15A-XT-1», бортовая УКВ радиостанция авиационного диапазона (118 ÷ 137 МГц) «ICOM A-110», бортовая УКВ антенна «CI-108», авиационная гарнитура, соединительные кабели и бортовой компьютер, подключенный к бортовому серверу БИВК. Бортовой навигационный контроллер обеспечивает прием и распознавание запросов с земли, определение и передачу координат воздушного судна по запросу с земли, организацию цифровой связи «земля-борт-земля» в узкополосном радиоканале авиационного диапазона УКВ 118 ÷ 137 МГц. Применяется пакетная связь, максимальная длина пакета 128 байт, контрольная сумма 2 байта, скорость передачи данных 1200 бод.

Состав компьютерного и сетевого оборудования БИВК самолета-лаборатории

БИВК самолета-лаборатории строится на базе промышленных компьютеров типа **IROBO-2000-40X5TRHN** и **IROBO-2000-43i5**. Жесткие диски компьютеров изготовлены в виброзащищенном исполнении и устанавливаются в антивибрационных корзинах.

В качестве центрального выбран сервер **iROBO-1000-20B8-SRGN**, имеющий 8 антивибрационных жестких дисков, допускающих «горячую за-

мену», емкостью по 1 Тб. В общей сложности на борту самолета установлено 23 компьютера. Все компьютеры АПК соединены в локальную сеть кабелями Ethernet 6 категории. Стандарт Ethernet позволяет использовать на борту сетевое оборудование, обеспечивающее гибкое подключение новых компьютеров к самолетной сети данных и высокую надежность подключения. В качестве центрального коммутатора, управляющего локальной вычислительной сетью самолета-лаборатории, установлен промышленный коммутатор **Catalyst 2955T**. Синхронизация внутренних часов всех компьютеров входящих в локальную сеть осуществляется сетевым сервером времени с GPS приемником **SyncServer S250**. Для подключения приборов с интерфейсами в виде последовательных портов типа RS - 232/422/485/ в бортовые компьютеры устанавливаются интерфейсные платы типа **MOXA CP-118U-I, MOXA CP-138U-I**. Приборы, имеющие протокол ARINC429, подключаются к компьютерам с помощью контроллеров **ARINC429 PCI429-4-1**. Для подключения приборов, имеющих аналоговые выходы, устанавливаются внешние модули аналогово-цифровых преобразователей типа **E 14-440** и **SEA ADC 16**.

Аппаратно-программный комплекс измерителей микрофизических параметров облаков и осадков, приборы которого имеют специальные высокоскоростные порты для передачи бинарных данных, подключен к собственной системе сбора данных **M300**, работающей под управлением операционной системы реального времени **QNX**. Система **M300**, также как и компьютеры других АПК, интегрирована в локальную вычислительную сеть самолета-лаборатории.

Для отображения информации и управления программным обеспечением аппаратно-программных комплексов установлены 19 дюймовые промышленные мониторы типа **FRM3191G** и серверные консоли **DMK-580-17**

Удаленный доступ к бортовой ЛВС самолета-лаборатории по каналам спутниковой связи обеспечивается с помощью маршрутизатора **Cisco Catalyst 2811**.

Для обеспечения возможности подготовки документов непосредственно на борту самолета-лаборатории на самолете устанавливается сетевой принтер **HP Laser Jet Pro P1102**.

Структура измерительной системы БИВК

Структурно в БИВК входят семь аппаратно-программных комплексов (АПК). В состав каждого комплекса входит от 1 до 7 компьютеров в зависимости от количества и функциональных особенностей подключаемой аппаратуры. В общей сложности в состав БИВК входит 67 измерительных прибо-

ров, которые регистрируют характеристики 116 различных физических величин, что составляет около 1000 измеряемых параметров.

В ходе работ были разработаны: программное обеспечение бортового и наземного архивов самолетных измерений на базе СУБД «InterBase», программное обеспечение, обеспечивающее запись данных АПК в бортовой архив, программа интерфейса для доступа к данным бортового и наземного архива «BIVKclient», программы имитаторы сигналов приборов АПК и интерфейс для записи и считывания данных.

На рис.3. представлена физическая топология компьютерной сети на борту ЯК-42Д, реализованной в программе Cisco Packet Tracer.

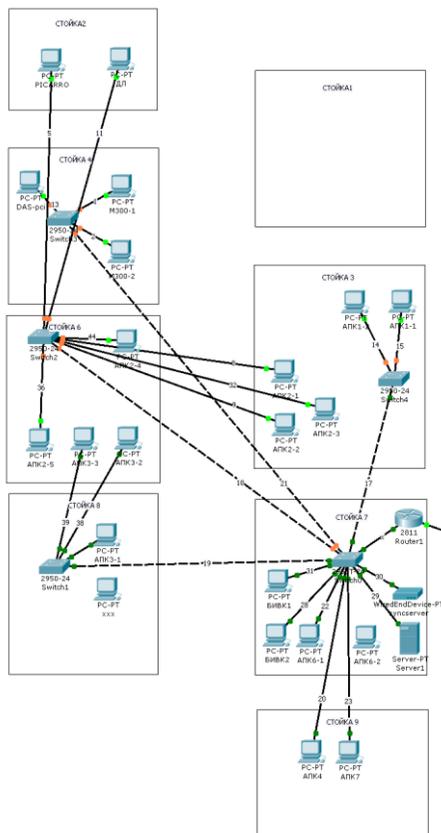


Рис.3. Физическая топология ЛВС самолета-лаборатории Як-42Д.

Общая структурная схема компьютерного и сетевого оборудования БИВК представлена на рис.4.

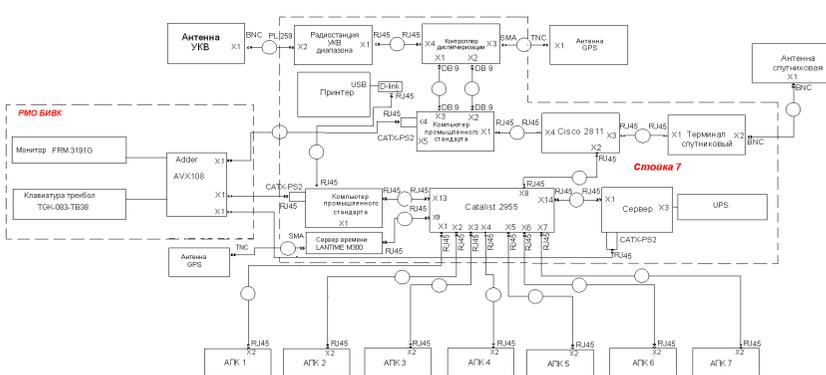


Рис.4. Структурная схема компьютерного и сетевого оборудования БИВК.

Управление сетевыми устройствами осуществляется с помощью программы Cisco Network Assistant установленной на компьютере BVK1. Эта программа позволяет решать следующие задачи:

- Управление настройками
- Отчеты об используемом оборудовании
- Уведомление о событиях
- Меню, основанное на задачах
- Управление файлами
- Модернизация программного обеспечения Cisco IOS.

Программное обеспечение БИВК

Программное обеспечение БИВК решает следующие задачи:

- подключение приборов и измерительных систем, имеющих различные интерфейсы и различные форматы передачи данных к системе сбора данных;
- обеспечение записи данных в самолетный архив в едином формате;
- обеспечение записи данных в самолетный архив с привязкой к единому времени.

Первая задача решалась разработкой интерфейсных программных модулей для каждого прибора или измерительной системы. Вторая задача решена осуществлением записи данных в самолетный архив с помощью системы управления базами данных (СУБД) «InterBase 2009». Третья задача

решалась синхронизацией всех компьютеров в сети с помощью сетевого сервера времени SyncServer S250 фирмы Symmetricom.

Программное обеспечение (ПО) системы сбора данных комплекса БИВК состоит из трех основных компонент:

ПО первого уровня предназначено для обработки данных, обеспечивающих интерфейс преобразования от измерительных систем АПК в единый формат. Поскольку передача данных от различных измерительных систем не унифицирована, то для каждой измерительной системы разрабатывался свой программный модуль. Задача этого модуля - принять данные от измерительной системы и сохранить данные в общем стандарте – XML файла.

ПО второго уровня обработки данных – это программы клиента базы данных (БД). Их задача принимать внешние данные в виде XML файла и записывать их в БД или же считывать данные из БД, используя средства управления базой данных для отображения данных и передачи их по компьютерной сети на другие АПК.

ПО третьего уровня обработки данных – это ПО управления базой данных и сами БД.

ПО третьего уровня состоит из семи баз данных. Данные каждого АПК сохраняются в локальной БД и передаются в общую базу данных, расположенную на сервере БИВК. Локальные БД являются точными копиями файлов общей базы данных.

В качестве системы управления базой данных (СУБД) используется система Interbase 2009 SMPT, которая позволяет одновременно записывать входящие данные в общую БД, и в локальные копии БД. Для обеспечения надежности регистрации получаемой информации на самолете-лаборатории требуется использование промежуточных файлов, поскольку прямая запись в базу данных сопряжена с риском потери информации при сбоях в самолетной информационной сети. Промежуточные файлы имеют формат XML (eXtensibleMarkupLanguage - расширяемый язык разметки), так называемый текстовый формат, предназначенный для хранения структурированных данных и для обмена информацией между программами.

Модель базы данных была разработана таким образом, чтобы подключение новых приборов и систем не нарушало целостности работы СУБД и в то же время обеспечивало максимальную интеграцию всех измерительных систем. На рис.5. представлена общая схема оборота данных в БИВК самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет».

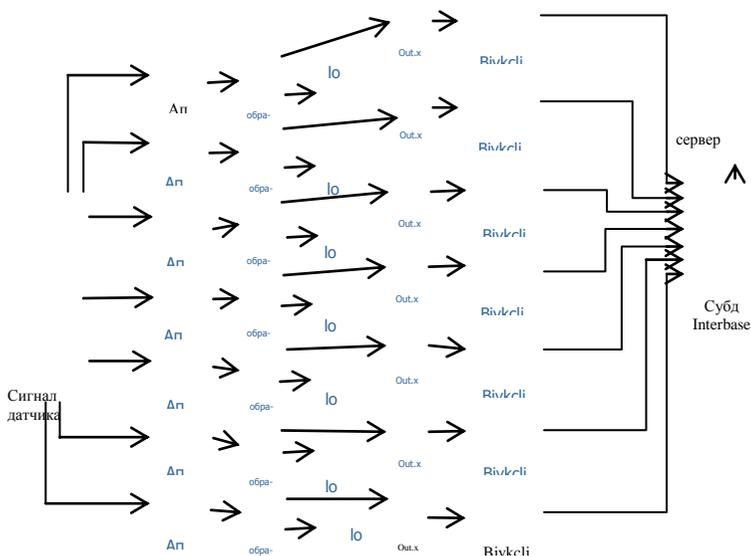


Рис.5. Общая схема прохождения данных в БИВК самолета-лаборатории Як-42Д.

Данные от датчиков через аппаратно-программные интерфейсы передаются в компьютеры АПК на обработку. Итогом обработки становятся 2 файла: Log, содержащий исходную информацию с датчиков (Raw Data) и Out.xml, содержащий информацию для занесения в базу данных. Программное обеспечение «Bivk_write» получает на вход файл Out.xml, затем записывает данные в БД на АПК и на сервер. Запись данных в БД осуществляется по средствам ПО СУБД InterBase 2009. Log файл содержит значения входных сигналов без обработки, в дальнейшем будет применен для возможности перерасчета параметров.

Файл «Out.xml» формируется одновременно с Log-файлом, но не сохраняется в дальнейшем и удаляется автоматически после переноса данных в БД. ПО «Bivk_write» преобразует данные Out.xml в диалект запроса sql, после чего отправляет запрос в СУБД InterBase (локальную и серверную). СУБД своими средствами проверяет верность данных. Проверка корректности данных осуществляется средствами ПО СУБД. При неправильных данных СУБД возвращает сообщение об ошибке, не прерывая запись (будет записываться только время, ячейки с данными будут пусты). Сообщение информирует оператора об ошибке в данном разделе.

Программы, входящие в состав БИВК

Конфигуратор БД. Программа предназначена для создания чистого экземпляра бортовой БД.

Проверка БД. Программа предназначена для проверки целостности структуры БД и создания тестовых файлов XML.

БИВК_WRITE. Программа предназначена для обработки XML файлов, записи физических данных в локальную и удаленную БД, удаления обработанных XML файлов. Обеспечивает возможность настройки скорости работы программы записи.

БИВК_READ. Программа предназначена для просмотра данных во время полета в режиме реального времени или по заданным промежуткам.

БИВК_zeml. Программа предназначена для просмотра собранных во время полета данных, построения графиков, передачи данных в excel.

АПК 1. Программа предназначена для просмотра данных во время полета в режиме реального времени оператором АПК 1.

Программа построения маршрута. Программа предназначена для формирования KML файлов для отображения маршрута и воздействий на карте. Интеграция измерительных систем в составе БИВК осуществляется через широковещательные UDP сообщения, с помощью которых наиболее общие параметры передаются между АПК по локальной сети.

Программа передачи метеорологических и навигационных параметров БИВК. Программа предназначена для передачи метеорологических и навигационных параметров по локальной компьютерной сети в формате широковещательной посылки UDP. Программа считывает последние записи из БД сервера, вычисляет физические параметры атмосферы (температуру, ветер) и передает данные в локальную сеть для других АПК.

Прием и отображение метеорологических и навигационных параметров БИВК. Программа предназначена для приема UDP посылки БИВК и отображения полученных данных на экране АПК (рис.6).

Программа приема данных АПК5 системы М300. Программа предназначена для приема UDP посылки от измерительного комплекса АПК5 М300, формирования xml файла для пересылки данных в бортовой архив (рис.7).

Прием посылки UDP и формирование RMC посылки протокола NMEA для навигационных систем. Программа предназначена для приема UDP посылки БИВК и формирования RMC строки для отображения маршрута во время полета на карте навигационной системы SAS планета (рис.8).

Вреня

Широта

Долгота

Азимут от точки привязки

Удаление от точки привязки

путевая скорость

истинная воздушная скорость

Курс (путевой угол)

высота GPS

высота над подстилающей поверхностью

барометрическая высота

Атмосферное Давление

Температура забортного воздуха

крен

тангаж

Скорость ветра

Направление ветра

Сигнал синхронизации времени

Сигнал начала режима

Влажность %

Рис.6. Рабочее окно программы приема UDP послыки.

UDP

Папка XML

Старт

Стоп

M300- serial No. 3086

UDP порт 17100

IP 0.0.0.0

M300-2

UDP порт 17101

IP 0.0.0.0

Рис.7. Рабочее окно программы приема UDP послыки от системы сбора M300.

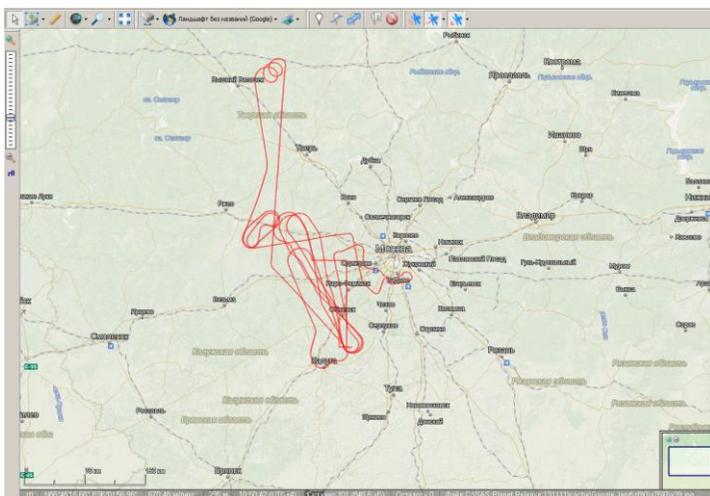


Рис.8. Отображение маршрута полета на навигационной карте.

ЦЕНТР МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ НАД ЮЖНЫМ РЕГИОНОМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**В.О. Тапасханов¹, А.Х. Аджиев¹, В.Н. Стасенко²,
А.В. Шаповалов¹, В.А. Шаповалов¹**

1 - ФГБУ «Высокогорный метеорологический институт», г. Нальчик

2 - ФГБУ «НИЦ «Планета», г. Москва

Для мониторинга опасных явлений погоды (ОЯП) над южным регионом Российской Федерации на базе ФГБУ «ВГИ» создан региональный центр. В Центре предполагается выполнение следующих мероприятий и задач:

- автоматизированный сбор первичной радиолокационной и грозорегистрационной информации на подконтрольной территории;
- предварительная обработка поступившей информации, ее архивация, хранение и передача потребителям;
- графическое представление информации в режиме реального времени;

- составление краткосрочных гидрометеорологических и метеорологических прогнозов;
- оперативный анализ ОЯП на подконтрольной территории, обнаружение и оповещение территориальных органов управления и МЧС об опасных метеорологических явлениях и процессах в регионе;
- анализ случаев экстремального состояния метеорологических параметров и процессов в регионе;
- обеспечение активных воздействий на атмосферные процессы (воздействие на облака и туманы, искусственное регулирование осадков, борьба с грозами и градом и др.).

Целью создания Регионального Центра мониторинга ОЯП является:

В области сверхкраткосрочного прогнозирования опасных явлений в интересах народного хозяйства:

- повысить уровень и качество обработки данных наблюдений МРЛ и ДМРЛ, объединенных в радиолокационную сеть, чтобы увеличить заблаговременность предупреждения об опасных погодных явлениях, информирования местных органов власти, МЧС и средств массовой информации;
- обеспечить возможность анализа метеорологических данных с больших территорий и графического представления результатов анализа;
- обеспечить оперативное и достоверное измерение интенсивности атмосферных осадков;
- установить локальные очаги с сильным ветром, определить скорость смещения опасных явлений погоды, распознать смерчи и шквалы с помощью МРЛ и ДМРЛ;
- повысить точность измерения интенсивности и количества осадков по территориям для использования в метеорологических и гидрологических прогнозах;
- обеспечить оперативное доведение информации непосредственно до инженерных служб, коммунального хозяйства, администрации городов;
- повысить качество работы эколого-прогностических центров по чрезвычайным ситуациям.

В области противоголодовой защиты и активных воздействий на метеорологические процессы:

- обеспечить более качественное выполнение технологии активных воздействий на метеорологические и другие геофизические процессы;
- обеспечить возможность использования радиолокационной информации, полученной со смежных радиолокаторов, для повышения надежности выполнения технологии воздействия, а также для получения дополнительной информации о градовых процессах;

- обеспечить внедрение в практику штормового оповещения и противоградовых работ новых эффективных методов, алгоритмов и программ обработки радиолокационной информации;

- обеспечить внедрение новых способов представления информации (в том числе трехмерные формы представления) повышающих качество анализа опасных метеорологических явлений;

- обеспечить повышение эффективности противоградовых работ за счет повышения стабильности работы метеорадиолокаторов и установленных на них средств автоматизации;

- повысить уровень информационного обеспечения активных воздействий на метеорологические и другие геофизические процессы, осуществляемые с использованием различных технологий (ракетные, наземные, авиационные).

В области метеорологического обеспечения авиации:

- обеспечить повышение уровня и качества метеообеспечения гражданской и ведомственной авиации в соответствии с требованиями, предъявляемыми автоматизированными системами управления воздушным движением, как по территории региона, так и в каждом аэропорту;

- повысить оперативность поставляемой радиолокационной информации для авиационных метеорологических центров УВД, внедрить перспективные системы и средства метеообеспечения (информационно-прогностические системы, доплеровские метеорологические радиолокаторы и т.д.);

- предоставить возможность использования метеорологической информации радиолокационной сети на мобильных транспортных средствах (в том числе авиационных).

В интересах развития наблюдательной сети Росгидромета и научных организаций:

- обеспечить возможность поступления оперативных радиолокационных данных в Центр метеорологических данных;

- обеспечить увеличение точности измерения метеорологических параметров облачных образований;

- обеспечить создание условий для комплексного использования радиолокационной информации, полученной с помощью сети и другой доступной метеорологической информации (территориального масштаба) в задачах прогнозирования опасных метеорологических явлений;

- обеспечить сокращение эксплуатационных расходов сети мониторинга ОЯП.

В соответствии с назначением и решаемыми задачами региональный центр мониторинга ОЯГ в ЮФО и СКФО должен быть оснащен следующими техническими средствами:

- метеорологическими радиолокаторами сантиметрового диапазона для наблюдения облаков и связанных с ними опасных явлений;
- измерителями напряженности электрического поля;
- грозорегистрационной системой;
- автоматическими метеостанциями;
- измерителем нижней границы облачности СТ-25К;

Совместное использование данных сети МРЛ и сети грозопеленгаторов позволит:

- реализовать непрерывные наблюдения за грозовыми разрядами;
- повысить вероятность определения слабых гроз;
- повысить точность определения скорости и направления перемещения метеорологических явлений, а также тенденции их развития;
- повысить качество классификации грозовых разрядов;
- повысить вероятность определения опасных метеорологических явлений;
- повысить надежность системы обнаружения опасных метеорологических явлений за счет дублирования возможностей определения времени и координат опасных метеорологических явлений;
- расширить число заинтересованных потребителей метеорологической информации, полученной с помощью сети грозопеленгаторов и радиолокационной сети МРЛ.

Совместное использование данных радиолокационной сети МРЛ и сети грозопеленгаторов включает:

- анализ поступающей от грозопеленгаторов информации о грозовых разрядах;
- расчет вероятности возникновения и определения тенденции грозовой деятельности;
- анализ оперативной радиолокационной информации от МРЛ радиолокационной сети;
- сопряжение и синхронизацию грозопеленгационных и радиолокационных данных полученных от МРЛ, работающих в составе сети;
- распознавание опасных метеорологических явлений на основе совместного анализа данных, поступающих из сети грозопеленгаторов и сети метеорологических радиолокаторов;
- автоматизированный прогноз развития опасных метеорологических явлений;

- сохранение измеренных параметров и координат грозовых разрядов в распределенной базе радиолокационных данных радиолокационной сети метеорологических радиолокаторов.

В региональный центр мониторинга ОЯП ЮФО и СКФО поступают следующие данные полевых наблюдений:

- метеорологических радиолокаторов сантиметрового диапазона, входящих в состав радиолокационной сети;
- измерителя напряженности электрического поля;
- грозорегистрационной системы;
- автоматических метеостанций;
- измерителя нижней границы облачности СТ-25К.

Данные МРЛ-5 представляют собой объемный файл в координатах: угол места, азимут, дальность. Файл состоит из заголовка и данных. Данные упакованы. Размер файлов составляет 50 -500 Кбайт. Частота передачи – 1 раз в 10 минут.

Имеется несколько типов файлов от новых радиолокаторов ДМРЛ-С. Файлы создаются в процессе работы программного обеспечения вторичной обработки радиолокационной информации "ГИМЕТ-2010".

Основной тип данных – это объемные данные в полярных координатах с высоким разрешением (радиальное разрешение составляет 250 м в режиме "отражаемость" и 125 метров в режиме "скорость"). Данные в файлах сжаты с помощью процедуры `compress2` из библиотеки `zlib`.

ДМРЛ-С выдает 7 параметров: отражаемость Z , радиальная скорость V , ширина спектра W , дифференциальная отражаемость Z_{dr} , дифференциальная фаза D_f , модуль кросс-корреляции M_{kr} , линейное деполаризационное соотношение L_{dr} . Каждый параметр хранится в отдельном массиве. Информация с каждого оборота состоит из заголовка и данных. Заголовок не сжат, сами данные сжаты с помощью функции `compress2` библиотеки `zlib`. Упаковка осуществляется на компьютере первичной обработки информации.

Информация с каждого оборота дописывается в конец радиолокационного файла. Полный радиолокационный файл содержит данные с нескольких оборотов, выполненных под различными углами места. Радиолокационный файл первого типа содержит столько заголовков и блоков сжатых данных, сколько углов места отработал ДМРЛ-С. Максимальный размер файлов составляет 6÷8 мбайт в зависимости от количества облачности в радиусе обзора (250 км или 125 км). Детальное описание формата радиолокационного файла ДМРЛ-С может быть получено в ФГБУ "ЦАО", г. Москва.

Кроме радиолокационных файлов ПО «ГИМЕТ-2010» формирует еще BUFR файлы, которые передаются с помощью сети АСПД в ГРМЦ по FTP

WMO протоколу. Обзоры проводятся каждые 10 мин, соответственно каждые 10 мин формируется набор BUFR файлов (от 24 до 39 файлов). Максимальный размер BUFR сообщения составляет 11 Кбайт. Регламент передачи радиолокационных файлов в региональный центр мониторинга ОЯП – один раз в 10 мин.

Данные грозопеленгатора представляют собой текстовый файл, в котором приведены координаты и параметры разрядов. Размер файлов составляет от 128 байт до 1000 Кбайт.

Выходными данными регионального центра по южному региону РФ являются:

- данные с МРЛ-5 - объемные файлы в полярных координатах с разрешением 1,4 гр. по азимуту и 0.25 км по дальности. Данные в файлах сжаты с помощью специального алгоритма. Объем данных с 1 радиолокатора составляет 0,2 – 2.0 Мбайт 1 раз в 10 минут;

- данные с ДМРЛ-С - объемные файлы в полярных координатах с разрешением 1,0 гр. по азимуту и 0.25 км по дальности. Данные в файлах сжаты с помощью функции compress2 библиотеки zlib версии 1.1.4 от 11.04. 2002. Максимальный размер файлов составляет 6÷8 Мбайт с 1 радиолокатора. Регламент передачи - 1 раз в 10 минут;

- данные с ДМРЛ-С - набор горизонтальных сечений всех радиолокационных продуктов с разрешением 1x1 км.. Максимальный размер файлов составляет 2÷3 Мбайт с 1 радиолокатора. Регламент передачи - 1 раз в 10 минут;

- данные с ДМРЛ-С - набор горизонтальных сечений всех радиолокационных продуктов с разрешением 2x2 км.. Максимальный размер файлов составляет 0,9 Мбайт с 1 радиолокатора. Регламент передачи - 1 раз в 10 минут;

- данные с ДМРЛ-С - набор горизонтальных сечений всех радиолокационных продуктов с разрешением 4x4 км.. Максимальный размер файлов составляет 0,3 Мбайт с 1 радиолокатора. Регламент передачи - 1 раз в 10 минут;

- данные грозорегистратора – координаты и характеристики грозовых разрядов и молний. Максимальный размер файлов составляет 0,2 Мбайт с 1 радиолокатора. Регламент передачи – 1 раз в минуту.

Для выполнения функциональных задач по передаче-приему информации об ОЯП региональный центр по южному региону РФ оснащен следующими телекоммуникационными средствами:

- выделенной телефонной линией;

- системами широкополосного доступа типа Motorola Conopy (до 5 Мбит/с);

- системами передачи данных GSM EDGE и 3G;
- системами широкополосной спутниковой связи типа VSAT;
- системой спутниковой информации «Митра» и др.

Телекоммуникационные средства обеспечивают своевременную передачу данных измерений от станций наблюдений в региональный центр для их последующей обработки, комплектации бюллетеней, подготовки анализов и прогностической продукции и архивации.

Для функционирования телекоммуникационных систем установлено:

- модемное или мультиплексорное оборудование;
- активное телекоммуникационное оборудование: маршрутизаторы, коммутаторы, сервера доступа;
- коммуникационные стойки для размещения оборудования;
- блоки бесперебойного питания.

Для передачи-приема метеорологических данных региональный центр по южному региону РФ подключается к ведомственной сети Росгидромета – АСПД.

Для обмена радиолокационными данными между различными уровнями иерархии системы используются следующие форматы передачи данных:

a. BUFR FM94 - (FM-94 BUFR collected papers and specification / European center for medium – range weather forecasts, February 1998 g. Издание 2001 г., рек. 3 КОС-ХII)

b. HDF5;

c. протокол для передачи данных в АС УВД;

d. Отраслевой стандарт объемного файла кругового обзора.

В соответствии с функциями и задачами регионального центра по южному региону РФ он укомплектован следующими информационно-вычислительными ресурсами: серверы типа (HP-Proliant) – 2 шт; графическая станция T-Opus – 1 шт; рабочие станции типа HP-Workstation - 10 шт; ПК на базе процессоров Intel Core Duo – 3 шт; принтеры - 2 шт; сканер - 1 шт.

Для выполнения задач, возложенных на региональный центр по южному региону РФ, задействовано следующее программно-математическое обеспечение:

- операционная система Windows XP, 7 - 7 комплектов;
- операционная система *RedHat Enterprise Linux* - 5 комплектов;
- Ubuntu Linux 12.4 – 4 комплекта;
- ПО ГИС (гео-информационная система) – 1 комплект;
- ПО СУБД (система управления базами данных) - 1 комплект;

- системы программирования Builder с++6, Delphi 2006;
- программное обеспечение приема, анализа, отображения и архивации ОЯП информации;
- программное обеспечение трехмерного представления метеорологических данных с привязкой к земному шару.

3-D отображение открывает широкие перспективы при анализе и интерпретации результатов наблюдений.

Характеристики операционных систем.

Microsoft Windows XP предоставляет инженерам, научным работникам и исследователям простоту и доступность для решения широкого круга производственных и научных задач.

RedHat Enterprise Linux является ведущей операционной системой, реализующей концепцию программного обеспечения с открытыми исходными текстами. Ориентированная на широкий спектр систем, начиная от персонального компьютера и заканчивая дата-центрами, RedHat Enterprise Linux объединяет инновационность открытых технологий и стабильность решений корпоративного класса. Операционную систему RedHat Enterprise Linux отличает высокая производительность, поддержка со стороны независимых производителей ПО, широкий набор сервисов и длительное время жизни всех выпущенных версий.

Ubuntu *LINUX* позволяет исследователям использовать преимущества Linux и открытых технологий, предоставляя высокопроизводительную, масштабируемую и безопасную платформу для корпоративных приложений. Эта операционная система обладает широкой функциональностью и надежностью, полностью обеспечивая потребности современной сетевой инфраструктуры, а также поддерживает различные аппаратные платформы и программные приложения.

Программные средства.

При исследовании метеорологических данных используются хорошо зарекомендовавшие себя приемы решения и стандартное (универсальное) математическое обеспечение ЭВМ. Применение систем MATLAB, MATHCAD, Borland Delphi, Borland C++ Builder, Qt повышает эффективность научных исследований, позволяет более эффективно проводить моделирование сложных объектов и явлений.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СБОРА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА БАЗЕ СЕТИ ПРОТИВОГРАДОВЫХ УСТАНОВОК «ЭЛИЯ-2»

А.М. Абшаев, Т.Х. Гузоев

*ФГБУ "Высокогорный геофизический институт",
г. Нальчик, abshaev@yahoo.com*

В разных странах мира развиваются различные методы прогноза града, в том числе локального, по данным полей распределения метеорологических параметров в приземном слое атмосферы (температура и давление воздуха, точка россы и др.).

Однако, зачастую низкая плотность расположения метеорологических станций не позволяет проводить прогноз с нужной достоверностью.

В 2009 г. на базе ФГБУ «Северо-Кавказская Военизированной служба по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы» (г. Нальчик) совместно с Научно-Производственным Центром "Антиград" (г. Нальчик) была развернута сеть из 29 автоматических противоградовых установок ПУ "Элия-2" (рис.1).



Рис. 1. Автоматическая противоградовая установка ПУ "Элия-2".

Автоматические пункты воздействия располагаются в основном на территории КБР (27 ед.), по одному пункту находится в КЧР и РСО Алания. Среднее расстояние между пунктами составляет 8-15 км (рис.2). Установки ПУ "Элия-2" имеют автономное электропитание на базе аккумуляторов и солнечных батарей, что исключает потерю информации при отключении

общего электропитания в поселковых населенных пунктах при прохождении грозы.

Помимо основных задач по запуску противогрозовых ракет, ПУ «Элия2» оснащена компактной метеостанцией (рис.3), измеряющей температуру, влажность и давление воздуха, закрепленной под контейнером с электроникой. В качестве датчика температуры и влажности выбран твердотельный чип SHT-15 industrial (фирма Sensirion), а датчика температуры и давления - чип SMD520 industrial (фирма BOSCH).

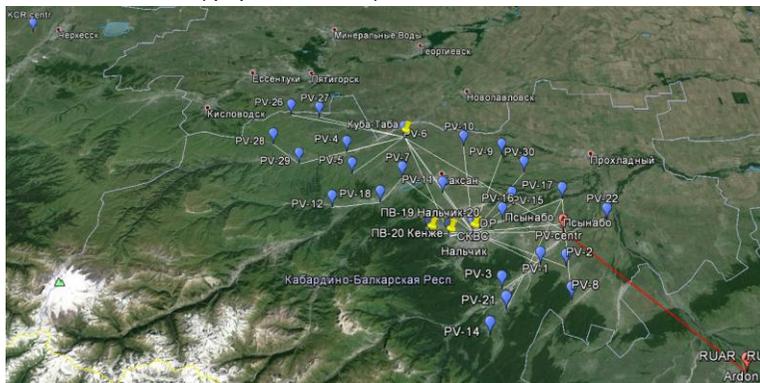


Рис.2. Схема расположения установок ПУ «Элия-2» на территории КБР, КЧР и РСО Алания (позиции пунктов отмечены красными квадратами).

Управление и обмен данными между командным пунктом и ПУ происходит дистанционно по каналам радиосвязи. В целях улучшения прохождения сигнала в горных и предгорных районах выбран диапазон частот 160 МГц, при котором прямая видимость не является обязательным условием, и радиопакет может доходить до цели после огибания наземных препятствий.



Рис.3. Встраиваемая в ПУ «Элия-2» метеостанция для измерения температуры, влажности и давления воздуха.

В 2013 г. был проведен комплекс полевых экспериментов, и в результате в качестве наиболее оптимального было выбрано радиооборудование Ripex-160 (фирма Racom, Чехия) (рис.4). Радиомодем размещается в контейнере с электроникой на ПУ «Элия-2» и на Командном пункте в г. Нальчик.



Рис.4. Радиомодемы VHF-диапазона Ripex-154 (Чехия).

Единым сервером сбора метеорологической информации является персональная ЭВМ с программным обеспечением "АСУ-Элия" (НПЦ "Антиград") (рис.5), расположенная в Ситуационном Центре Северо-Кавказской противорадовой службы в г. Нальчик.

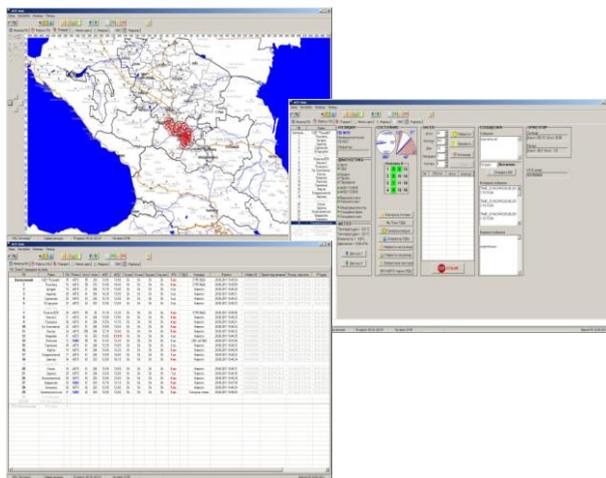


Рис.5. Программное обеспечение «АСУ-Элия» для управления противорадовыми установками и сбора метеорологической информации.

Частота сбора информации может регулироваться от 1 сек до 3 часов. В итоге формируются таблицы измеренных параметров отдельно по каждому пункту наблюдения и сводные по всем пунктам (рис.6).

В 2013 г. проведена предварительная валидация измерений температуры, влажности и давления воздуха. Для этого привлекались аналогичные

измерения с помощью сертифицированной автоматической погодной станции AWS300 (фирма Вайсала, Финляндия), установленной на научно-исследовательском полигоне ВГИ "Кызбурун".

ASU-ELIA meteorological data (2013-09-01 02:30-52)

NN	Temper1(C)	Temper2(C)	Humidity(%)	Pressure(Pa)	Elia-2	PV	Name
1)	28,1	20,0	0,0	91649	35		Центральный КДП Псынабо
2)	19,1	19,8	88,0	95904	16	1	Псыгансу
3)	23,3	23,2	69,8	96512	19	2	Аргудан
4)	19,2	19,3	85,2	94207	28	3	Аушгер
5)	17,8	17,8	83,8	93223	25	4	Сармаково
6)	26,8	27,1	48,1	90688	33	5	В.Куркужин
7)	23,4	18,3	88,5	68822	30	15	Герменчик
8)	21,3	21,2	79,9	96891	14	16	Нартан
9)	26,8	27,3	55,1	93481	18	20	Кенже
10)	18,4	19,0	91,3	93322	38	21	Зараггж
11)	18,1	18,4	87,1	97865	13	30	Благовещенка

Рис.6. Пример сводной таблицы метеопараметров.

Сравнение показало некоторое отклонение абсолютных значений метеопараметров, измеренных с помощью ПУ «Элия-2». Установлено, что причиной такого отклонения, является недостаточная вентилируемость метеостанции, и в итоге приняты меры по устранению этого недостатка. Другой причиной отклонения является то, что измерительные датчики станции AWS300 расположены на высоте 2-3 м от поверхности земли, покрытой травой, в то время как наша метеостанция расположена в полуметре от земли над бетонной площадкой (рис.7).

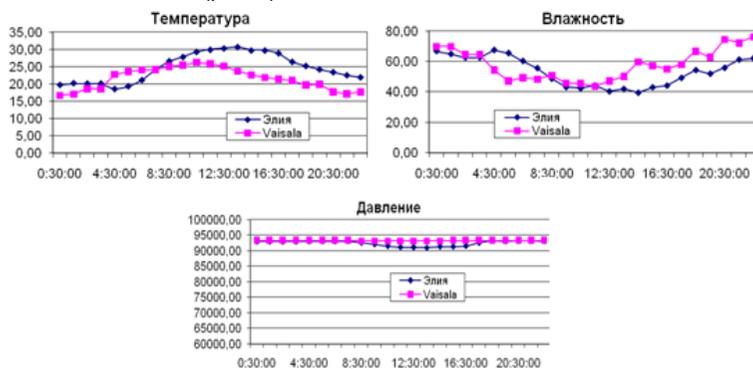


Рис.7. Сравнение показаний AWS300 (Vaisala) и метеостанции ПУ «Элия-2».

Некоторые результаты

Для анализа изменений метеорологических параметров воздуха в приземном слое (1м) при развитии грозоградовых процессов по материалам августа 2013 г. было выбраны несколько дней, наиболее показательным из которых был 31 августа 2013 г. В этот день в период локального времени 17-18 часов над территорией КБР наблюдалось развитие мощной конвективной облачности, перемещающейся на юго-восток в сторону Чечни, Дагестана и севера Грузии, где были отмечены значительные подтопления в связи с сильными осадками с градом и шквалом.

Из 27 пунктов были выбраны те, над которыми в этот период наблюдалось развитие или прохождение конвективной облачности. На рис.8 представлены графики изменения метеорологических параметров для пункта Псынабо в Урванском районе КБР. Красными вертикальными линиями здесь показан промежуток времени, при котором наблюдалась мощная конвективная облачность, зеленая линия индицирует момент начала изменения соответствующего параметра.

Как видно из рисунка, в момент регистрации конвективной облачности над пунктом происходит существенное изменение всех измеряемых параметров: относительная влажность уменьшалась на 8 - 10% (рис.8а), давление уменьшилось на 1000 Паскалей (рис.8б), а температура увеличилась на 1-3 градуса (рис.8в).

Однако из анализа графиков видно, что изменение метеорологических параметров началось еще за 20-40 минут до появления конвективной облачности. Первыми изменились температура и давление (за 40 минут) и только потом (влажность) (за 20 минут).



(а)



(б)



(в)

Рис.8. Изменение метеорологических параметров воздуха в приземном слое по данным пункта Псынабо, КБР, 31.08.2013.

Выводы и рекомендации

1. Анализ, проведенный на небольшой выборке, показал, что метеорологические параметры воздуха (температура, влажность, давление) в приземном (1-3 м) слое могут быть предвестниками развития и прохождения мощной конвективной облачности. Заблаговременность индикации такой облачности над наблюдаемым пунктом может составлять до получаса.

2. В 2014 г. планируется завершить переход всех пунктов на радиосвязь с целью улучшения качества связи с командным пунктом и начать сбор информации в дни с прохождением градовых процессов.

3. В 2015 г. планируется продолжить сбор данных и выявить закономерности и пределы вариаций абсолютных значений метеопараметров в дни с градовыми процессами различной мощности. По результатам анализа планируется разработать краткосрочный фоновый метод прогноза града.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Г.И. Мазуров¹, В.П. Белогуб², В.И. Акселевич³

¹ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

²ФБУ "ЦЛАТИ по Северо-Западному Федеральному округу"

³Санкт-Петербургский университет управления и экономики

Введение

В статье [3] было показано положительное совпадение результатов численного моделирования аэродинамического спутного следа (АСС), возникающего при обтекании плоской модели морского судна (МС) и результатов натуральных экспериментов по визуализации такого следа над Балтийским и Черным морями с использованием негигроскопических реагентов, и только упоминается, что были проведены лабораторные эксперименты.

В данной статье описывается методика по моделированию вихревых потоков, создаваемых МС при его обтекании набегающим воздушным потоком. Лабораторные эксперименты производились в аэродинамической трубе и гидролотке.

В отличие от численного эксперимента эти виды моделирования произведены для объемных моделей кораблей, т.е. с палубными надстройками. Для проведения эксперимента была изготовлена модель корабля в масштабе 1:100 ($L = 995$ мм) со всеми палубными надстройками. Полученные результаты также сравниваются с результатами натуральных экспериментов, выполненных над Балтийским и Черным морями.

1. Аэродинамическое моделирование воздушных потоков за морскими судами в аэродинамической трубе

Исследования носили экспериментально-теоретический характер, поскольку обдув модели производился на основе использования теории гидродинамического подобия [2]. Известно, что при движении надводного корабля в обтекаемом воздушном потоке образуются вихревые области. Они характеризуются высокими местными скоростями и сильным перемешиванием воздушных частиц или объемов воздуха. Структура этих скоростей (размеры и местные скосы потока) зависит от формы корпуса, надстроек и угла между

вектором скорости набегающего невозмущенного воздушного потока и продольной осью корабля.

На объемной модели корабля с палубными надстройками было выделено 5 сечений А, В, С, D, Е на расстояниях (для реального МС) 15, 30, 46, 69 и 89 м (на корме) соответственно и два сечения F, G за кормой в АСС.

Аэродинамическая труба имеет открытую рабочую часть круглого сечения с диаметром 1200 мм. Таким образом, установленная на оси модель МС может быть свободно поворачиваться вдоль вертикальной оси. Максимальная скорость потока в ней может достигать 70 м/с.

В рабочей части устанавливался плоский экран, на котором крепилась модель. Экран имитировал поверхность раздела двух сред – жидкой и газообразной (море – атмосфера). Штормовые условия и волнообразование на море не учитывались в силу трудностей моделирования, а также из-за малого влияния слабых волн воды на характер обтекания надводной части корабля. Действительно при небольших скоростях ветра поперечные размеры волн воды в натуральных условиях много меньше поперечных размеров корабля.

Для определения структуры воздушного потока использовался метод парового экрана [4], суть которого состоит в следующем. В набегающий воздушный поток вводятся равномерно распределенные мельчайшие капли воды, которые увлекаются потоком и вместе с ним «обтекают» исследуемую модель. Благодаря своей массе при вихревом движении потока более крупные частицы отбрасываются центробежными силами от центра вращения, поэтому их плотность в вихревых областях заметно уменьшается. Перераспределение плотности капель фиксировалось в световой плоскости, создаваемой сканирующим лучом лазера, и регистрировалось с помощью фотоаппаратуры в семи сечениях при углах $\beta = 0, 30, 90, 180^\circ$ (рис.1).

В данном исследовании нас интересуют только результаты обдува под первыми двумя углами, когда возникает наиболее устойчивый АСС. При этом при угле обдува 30° создаваемое облако может смещаться в обслуживаемый район.

На рис.1 показан пример обдува объемной модели корабля с его реальными размерами под углом $\beta=30^\circ$ со скоростью потока 26 м/с. Перед моделью видны форсунки, разбрызгивающие мельчайшие капельки воды, и показаны поворот оси модели на 30° и центр вращения, позволяющий поворачивать модель под любым углом к набегающему потоку.

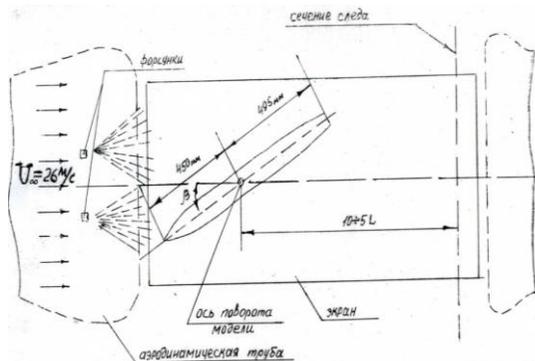


Рис.1. Расположение объемной модели МС при ее обдуве под углом $\beta=30^\circ$ к продольной оси корабля в аэродинамической трубе.

Для определения направления завихренностей использовались «шелковинки» - тонкие, легкие ниточки, прикрепленные к щупу, с помощью которого исследовалась структура потока в 7 контрольных сечениях модели (А, В, С, D, Е, F, G).

Описанный метод исследования позволяет визуализировать и получить геометрические размеры вихрей и зоны возмущенного потока. На рис. 2 представлены примеры фотоснимков в 3-х сечениях при обдуве под углом 0 (вверху) и 30° (внизу).

Ранее экспериментальными исследованиями установлено, что вихревая структура воздушного потока при различных скоростях обтекания остается одинаковой [1]. Не изменяются и поперечные геометрические размеры вихрей, меняется лишь их интенсивность. В связи с этим эксперимент по обдуву модели корабля приводился при постоянной скорости набегающего воздушного потока 26 м/с. Полученные формы циркуляции и геометрические размеры можно считать пригодными для различных режимов скоростей обтекания.

Результаты натурных экспериментов показали, что с изменением скорости движения действительно не изменяются поперечные размеры вихрей и их структура, а изменяется горизонтальная протяженность спутного следа за счет изменения интенсивности циркуляции в вихрях и времени их существования. Поэтому спутный след при больших скоростях движения корабля оказывается более устойчивым и протяженным, т.е. за счет своей повышенной «жесткости» более длительное время способен противостоять естественной турбулентности атмосферы.

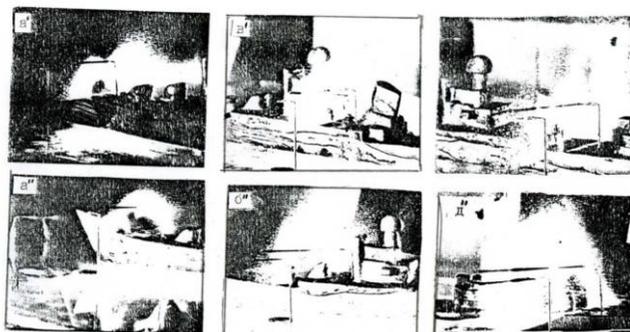


Рис.2. Фотоснимки структур вихревых потоков, визуализированные мельчайшими капельками воды, разбрызганными форсунками, в трех первых сечениях(а', в',г) при обдуве модели под углом $\beta=0^\circ$ (вверху) и трех сечениях (а'', б'', д'')при обдуве под углом $\beta=30^\circ$ (внизу).

При обдуве модели в аэродинамической трубе под различными углами были получены фотоснимки структуры вихревых потоков в семи сечениях. Анализ этих фотоснимков позволил представить картину потоков схематически.

Рассмотрим их структуру в основном в семи характерных сечениях для углов скольжения $\beta = 0$ и 30° . Расположение этих сечений следующее: А - в носовой части, В - перед выхлопной трубой, С - перед основной надстройкой, D - за ней, Е - на корме и два сечения F, G - за кормой.

В сечении А структура воздушных потоков характеризуется образованием двух симметричных вихрей с разными направлениями вращений. При анализе фотоснимков (рис. 2) установлено, что оба вихря имеют внутренний радиус $R = 1,3$ м (рис.3а) и располагаются над палубой вдоль бортов; причем вдоль левого борта вихрь имеет вращение по часовой стрелке, вдоль правого – против.

Сечение В располагается перед выхлопной трубой. В нем вихри сохраняются по обе стороны от продольной оси корабля. Геометрические размеры вихревой области увеличились по сравнению с сечением А до радиуса 2,25 м, но интенсивность вихрей ослабла (рис.3б).

Сечение С располагается за трубой перед основной надстройкой. Наличие мощного препятствия приводит к «раздвиганию» вихрей и ослаблению их интенсивности (разрушение ядер). На фотоснимках прослеживается аэродинамическая тень от трубы, характеризующаяся перемешиванием в ней

объемов воздуха. Наибольшая высота зоны возмущения над палубой составляет 15,5 м (рис.3в).

В сечении D наблюдается аналогичная картина. Сохраняется аэродинамическая тень от надстройки и трубы. Зона возмущения выступает также на 7 м за каждый борт. Вихревые области имеют ослабленную интенсивность (рис.3г)

Постепенное размывание вихрей и аэродинамических теней приводит к однородной вихревой области на корме. Это видно на рис. 3д в сечении -Е. Достаточно контрастно выделяется аэродинамическая тень от кормовой орудийной башни.

В сеченияхF, G прослеживается постепенно расширяющийся, а затем ослабевающий однородный аэродинамический спутный след корабля, размеры которого аналогичны размерам, полученным при численном моделировании в [3].

Таким образом, при $\beta = 0^\circ$ вокруг движущегося корабля образуются вихревые возмущения, границы которых расходятся от носа корабля под углом $\gamma = 58^\circ$ в горизонтальной плоскости и поднимаются под углом $\alpha = 11^\circ$ в вертикальной. Максимальная ширина зоны возмущения 24 м и максимальная высота 15 м.

В аэродинамической трубе хорошо прослеживалась симметричная картина воздушных потоков с завихрениями вдоль правого и левого бортов при обдуве модели строго вдоль продольной ее оси (под углом 0°).

Затем появляется аэродинамическая тень от палубных надстроек и выхлопной трубы. На корме и далее за ней прослеживается сплошная зона воздушного возмущения в виде аэродинамического следа.

Из рис.3 видно, что вдоль правого борта возникает вихрь с вращением против хода часовой стрелки, а вдоль левого – по ходу стрелки. На нем указаны размеры возникающих зон возмущения воздушных потоков в пересчете на МС длиной около 100 м.

При других углах обдува (имеются в виду углы: 30° - ветер с боку, 90° - ветер поперек судна и 180° - ветер с кормы при дрейфе), симметрия нарушалась и возникала более сложная картина воздушных потоков с ослабленным аэродинамическим следом.

При обдуве корабля под углом более 0° ширина корабля в исследуемых сечениях увеличивается (за счет поворота модели по отношению к набегающему потоку и лучу лазера). Это объясняется тем, что световая плоскость, создаваемая сканирующим лучом лазера, перпендикулярна вектору невозмущенного потока, а не продольной оси корабля.

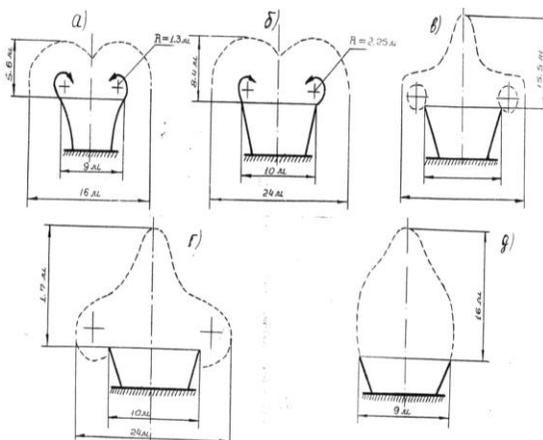


Рис.3. Схематическая структура вихревых потоков при обдуве объемной модели корабля под углом $\beta=0^\circ$ в аэродинамической трубе. Сечения а, б (удаление 15 и 30 м) – до палубных надстроек; в, г (45 и 60 м) – после них (появилась аэродинамическая тень от них); д (90 м от носа МС)– на корме и за ней (сплошная зона возмущения потока).

В сечении А при обдуве модели справа под углом $\beta = 30^\circ$ правый носовой вихрь покрывает почти всю правую часть палубы, вдоль левого борта образуется самостоятельный вихрь, но значительно меньше правого. Вершина зоны возмущения совпадает с вертикальной осью модели. Правый носовой вихрь вытесняет левый, а последний переходит под борт (т.е. «сваливается»). Размеры зон показаны на рис.4а.

В сечении В (рис.4б) хорошо виден вихрь, перешедший с правого борта на левый. Однако на правом борту образуется новый, который существует только в этом сечении, так как в дальнейшем разрушается центральной надстройкой. Вершина зоны возмущения находится над левым бортом и достигает 10 м. Достаточно большой угол скольжения β и наличие надстройки приводит к разрушению ядра этого вихря и объединению вихревой зоны с аэродинамической тенью центральной надстройки.

В сечении С зона возмущения имеет грушевидную форму (рис.4в). Крестиком показан центр разрушенного вихря. Наибольшая высота зоны возмущения 14,5 м, ширина – 23 м. Пик зоны возмущения находится над левым бортом. Сама зона выступает за левый борт на 11 м.

Аналогичная картина наблюдается и в сечениях D и E (рис.4 г,д), только больших размеров с двумя пиками зон возмущения. Левый пик связан с аэродинамической тенью от основной (центральной) надстройки, правый – с тенью от трубы. Располагается он над левым бортом.

Таким образом, при $\beta = 30^\circ$ зона возмущения располагается по подветренному борту и над кораблем, а вдоль наветренного борта возникает срывающая зона.

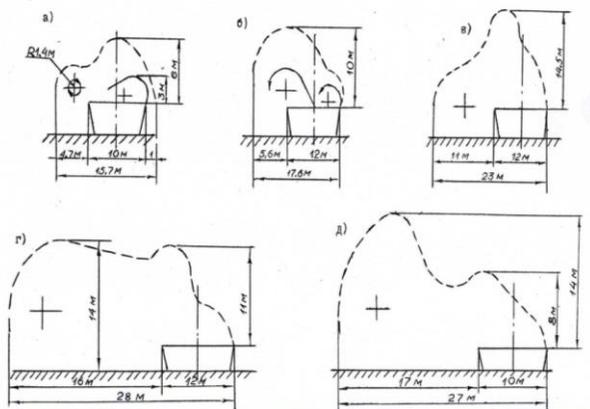


Рис.4. Схематическая структура вихревых потоков и их размеры при обдуве модели под углом 30° с правого борта.

В сечениях F,G за кормой прослеживается в основном только вихрь, возникающий от наветренного борта, а от подветренного борта возмущение потока очень слабое, с трудом напоминает деформированный вихрь, который сваливается за подветренный борт и стелется вдоль водной поверхности.

Проведенное исследование обладает достаточной новизной, поскольку в аэродинамической трубе обдувалась объемная модель корабля с симметричными надстройками, в то время как ранее [1] подобные исследования проводились с моделями без надстроек или со смещенными (асимметричными) надстройками в интересах кораблей-авианосителей.

Как вихревые потоки, так и аэродинамические тени от палубных надстроек приводят к возникновению горизонтального и вертикального сдвига ветра, структура которого осложняется наличием объемных надстроек.

Знание пространственно-временного распределения искусственного сдвига ветра (МЗН), а также его интенсивность в различных точках возмущенных зон требуется также для повышения безопасности полетов ЛА палубного базирования [5] и для повышения надежности и успешности натурных экспериментов для визуализации МЗН.

Для повышения точности метеорологических наблюдений и их репрезентативности датчики метеоприборов необходимо выносить в невозмущен-

ный поток. Для этого их целесообразно устанавливать в носовой части на горизонтальной штанге длиной не менее половины высоты корпуса корабля с наветренной стороны.

Результаты, полученные в лабораторном эксперименте, позволили выработать некоторые практические рекомендации как по размещению форсунок, так и по режиму их работы, которые были использованы при проведении натурных экспериментов.

2. Гидродинамическое моделирование обтекания моделей морских судов в гидролотке

Исследование особенностей обтекания объемной модели корабля в жидкой среде проводилось в лаборатории Киевского Высшего военного инженерного училища, в котором имеется гидролоток. В нем наглядно прослеживается ось вихря, обтекающего модель. Это производится путем пуска подкрашенной жидкости через форсунки в носовой части модели в общий поток жидкости.

Обтекание проводилось при трех углах основного потока жидкости: при $0,5^\circ$; 4° и 8° . Результаты обтекания фиксировались с помощью фотоаппарата в трех проекциях: вид сверху, вид с подветренной стороны и вид с наветренной. Модель использовалась аналогичная той, что и при обдуве в аэродинамической трубе.

Подкрашенные струйки наглядно визуализировали направление слабо возмущенного обтекающего потока и возникающие завихрения. Нам требовалось определить именно более конкретное положение оси вихря.

При угле обтекания $\beta = 0,5^\circ$ (рис.4), также как при аэродинамическом моделировании при $\beta = 0^\circ$ вдоль левого и правого борта, прослеживаются почти симметричные вихри в виде подкрашенных струек.

На фотоснимке (рис. 5Б) вихри располагаются на уровне борта (вид сбоку). Именно на оси этих вихрей следует вводить реагент в натурных экспериментах [7]. При обтекании модели под другими углами (более 0° , но менее 90°) вихри с подветренного борта сваливаются ниже него, а с наветренного борта, попадая на палубу, разрушаются палубными надстройками [8].

При угле обтекания $\beta > 0^\circ$ (из-за большей плотности воды, чем воздуха этот угол составлял всего 4° или 8°) как и при аэродинамическом моделировании при угле 30° вихрь от подветренного борта сваливается под него на поверхность раздела двух сред (в данном эксперименте – это твердая поверхность плоской подставки под моделью).

В целом, при эксперименте в гидрлотке лучше, чем при аэродинамическом моделировании прослеживалась ось симметрии горизонтального вихря, а размеры вихрей и границы зон возмущения, наоборот, более четко определялись в трубе. В итоге эти два вида моделирования позволили точно выявить точки возникновения вихрей и их ось. В этих точках были установлены форсунки для выпуска реагента в натуральных экспериментах, а картины обтекания моделей под углом $\beta > 0$ позволили определить режим их работы.

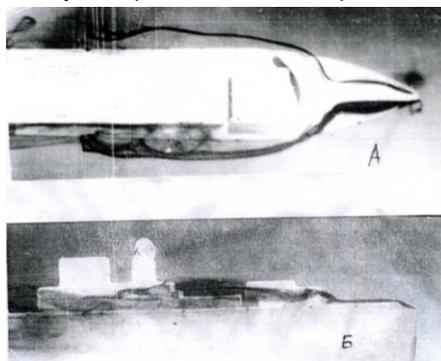


Рис.5. Обтекание модели МС в гидрлотке под углом $\beta = 0,5^\circ$.
Темным оттенком визуализирована ось струи, подкрашенная жидкостью.
А – вид сверху; Б – вид сбоку.

Картины обтекания, полученные в лабораторных экспериментах, полностью подтвердились при натуральных, проведенных в июне 1981 над Балтийским морем и в августе 1982 г. над Черным морем. Однако в первых картины потоков были более детализированы, а в натуральных экспериментах более сглажены.

При этом в натуральных экспериментах более устойчивое образование возникало при движении корабля строго против ветра на повышенной скорости движения, а при боковом ветре вихри ослабевали и сваливались на поверхность воды.

3. Сравнение результатов лабораторных и натуральных экспериментов

В натуральных экспериментах при благоприятных аэрогидрометеорологических условиях и скорости движения корабля-постановщика строго против ветра картина спутного следа в основном совпадала с картиной потоков, полученной при их моделировании в аэродинамической трубе, а протяженность следа достигала 2 км [7].

Сравним результаты трубного и натурального экспериментов, которые представлены в табл. 1 под углами 0 и 30°.

Таблица 1. Некоторые характеристики вихревых зон по данным трубного (тр) и натурального (нат) экспериментов при обтекании под углом ветра $\beta = 0^\circ$ и $\beta = 30^\circ$.

Сечение	$\beta = 0^\circ$				$\beta = 30^\circ$			
	Высота вихревой зоны в эксперименте (м)		Радиус вихря в эксперименте (м)		Высота вихревой зоны в эксперименте (м)		Радиус вихря в эксперименте (м)	
	тр.	нат.	тр.	нат.	тр.	нат.	тр.	нат.
А	5,6	-	1,3	-	6,0	-	1,4	-
Б	8,4	10,0	2,25	2,4	10,0	13,0	3,0	4,5
В	15,5	17,0	-	2,8	14,5	18,0	-	-
Д	17,0	-	-	-	14,0	20,0	-	-
Е	16,0	-	-	-	14,0	38,0	-	-

В случаях обтекания модели и реального МС под углом 0 и 30° были рассчитаны высоты вихревых зон и радиусы возникающих вихрей для первых пяти сечений в пределах корабля при лабораторных и натуральных экспериментах.

Таблица 2. Высота (м) вихревых зон по данным численного, трубного и натурального эксперимента при обтекании под углом $\beta = 0^\circ$.

Удаление, м	15	30	45	60	90	260	460	>600
Сечение Вид эксперимента	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Численный	-	-	-	15	25	40	60	-
Трубный	5,6	8,4	15,5	17	16	20	-	-
Натурный	-	10	17	40	60	100	150	200

Анализ данных табл.1 показывает удовлетворительное совпадение рассчитанных и реальных размеров вихревых зон, поскольку их порядок одинаков, а значения при натурном эксперименте, как правило, всего на 15-30% больше, чем при трубном. Исключением является высота вихревой зоны в сечении Е при $\beta = 30^\circ$, где различие составляет 100 %.

Четко прослеживается экономическая эффективность обдува модели корабля в аэродинамической трубе по сравнению с проведением натуральных экспериментов. Действительно, в лаборатории эксперимент проводили 3-4 человека, а в натурном эксперименте принимали участие представители (по 3-5 человек) от 14-15 организаций, а также Черноморский флот и его военно-

морская авиация. Фотоснимки же результатов экспериментов были аналогичны. В итоге методика проведения лабораторного эксперимента в аэродинамической трубе и его результаты были одобрены академиком И.В. Петряновым-Соколовым, который курировал эти работы.

Основные выводы и рекомендации по проведенным экспериментам (лабораторным и натурным) могут быть сведены к следующему:

1. Картина вихревых потоков в трубном эксперименте более идеализирована, чем в натурном. Однако, если схематизировать результаты последнего, отбросив отдельные детали, то получится удовлетворительное совпадение.

2. Выводы, полученные при гидро- и аэродинамическом моделировании, позволили выработать некоторые рекомендации по месту установки форсунок на корабле и режиму их работы с целью повышения эффективности создания облачных образований. В том числе отключение форсунки на подветренном борту с целью экономии реагента, а также подать заявку на изобретение на способ создания облачных образований в АСС МС и получить положительное решение (патент № 1827751) [6].

3. Возникающие же при движении корабля вихри (подобные вихрям, выявленным в трубном эксперименте) создают циркуляцию по замкнутому контуру. Она противостоит естественной турбулентности и способствует интенсивному перемешиванию воздуха. Это приводит к быстрому выравниванию температур реагента и окружающего воздуха, что способствует уменьшению архимедовых сил. Во всех случаях пуска дымов с движущегося корабля дымовое облако развивалось в приводном слое воздуха (нижняя его граница совпадала с водной поверхностью). Облако сохранялось до 25-30 мин.

4. Угол развития облака α с учетом влияния факела выхлопных газов энергетической установки и скорости обтекания корабля составляет от 3° до 30° против 11° в трубном эксперименте и 7° при численном моделировании без палубных надстроек. Максимальная высота зоны возмущения в зависимости от стратификации атмосферы (наличие или отсутствие задерживающих слоев) находится в пределах 150-200 м, а ее протяженность составляет до 2–3 км.

5. Натурные эксперименты в Севастополе показали целесообразность проведения лабораторных моделирований. Преимуществом их является простота, экономичность и возможность использования различных вариантов, выполнение которых в натуральных экспериментах требует длительного ожидания необходимых погодных условий у моря.

Список литературы

1. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. - М.: Наука, 1976. – 252 с.
2. Лаврентьев М.А., Шабад Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. - М.: Наука, 1973. – 416 с.
3. Мазуров Г.И., Акселевич В.И. Сравнительный анализ теоретических и натурных экспериментов по созданию искусственных облачных образований над морем//Тезисы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. - Нальчик, 2011. – С. 111-113.
4. Мазуров Г.И., Кузнецов Ю.М., Белогуб В.П. Исследование структуры воздушных потоков над кораблем//Сб. статей ВНО ВВВАИУ, Воронеж. – 1983. - С. 52-61.
5. Мазуров Г.И., Мушенко П.М., Бушуева Е.И. Оценка вклада топлива в образование облачных следов за морскими судами //Тр. ГГО. - 1991. – Вып. 536. - С. 58-66.
6. Мазуров Г.И., Кузнецов Ю.М. Способ образования искусственного тумана над водной поверхностью. - А/с № 1827751. Приоритетом от 22.05.1990. – 3 с.
7. Мазуров Г.И. Основные результаты численных, лабораторных и натурных экспериментов по созданию искусственных облачных образований//Метеоспектр. – 2009. - № 4. – С.55-72.
8. Мазуров Г.И., Белогуб В.П. Антропогенные облачные образования: условия возникновения и возможности регулирования их развития//Метеоспектр. - 2009. - № 1. – С. 81-90.

СВЯЗЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБЛАЧНЫХ ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ С МИКРОСТРУКТУРОЙ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

Е.А. Стулов, Н.О. Плауде, И.П. Паршуткина, Б.Г. Данелян

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный

Известно, что большую часть естественных облачных ядер конденсации (ОЯК) составляют частицы диаметром 0,1-5 мкм. Меньшие частицы при прочих равных условиях требуют больших пересыщений, концентрация сверхкрупных ядер (>1 мкм) слишком мала. Поскольку концентрация аэрозольных частиц увеличивается по экспоненте с уменьшением их радиуса, а в реальной атмосфере пересыщение редко превышает 1-2%, наибольшее количество облачных ядер конденсации приходится на размеры частиц от 0,1 до 1 мкм (крупные субмикронные частицы). Чем меньше концентрация крупных субмикронных частиц, тем выше вероятность активизации более мелких ядер (< 0.1 мкм – т.н. ядер Айткена) и тем большие пересыщения могут наблюдаться в облаке. В то же время нужно иметь в виду, что активация ядра конденсации помимо его размера и величины пересыщения зависит от его химического состава, доли растворимой части, формы и электрического заряда. Поэтому определить четкую зависимость размер ядра - пересыщение можно только для однородных сферических ядер [3].

Детальная связь концентрации и свойств облачных ядер конденсации с размерами атмосферных аэрозольных частиц практически не изучена. В ЦАО в 2013 г. были проведены систематические измерения концентрации ОЯК параллельно с измерениями спектра размеров аэрозольных частиц в диапазоне размеров 0,01–20 мкм на наземном измерительном пункте в г. Долгопрудный (Моск. обл., 3 км на ССЗ от границы Москвы). Полученные данные позволили установить некоторые общие закономерности вариаций общего аэрозоля и облачных ядер конденсации.

Для анализа использовались данные, полученные с помощью трех приборов: электрического анализатора аэрозоля фирмы TSI, модель 3030 (измерения спектра размеров частиц в интервале 0,01-1 мкм), оптического спектрометра частиц Solair-1001⁺ (измерения частиц размером 0,1-20 мкм) и точного счетчика облачных ядер конденсации CCN-200 (измерения концентрации ОЯК в интервале пересыщений водяного пара 0,1–1,1%).

Существенный интерес представляет внутрисезонная и годовая изменчивость концентрации ядер конденсации.

Измерения показали, что концентрация ОЯК испытывает серьезные колебания от дня ко дню и от сезона к сезону (рис.1). В целом годовой ход концентрации ЯК соответствует годовому ходу концентрации крупных субмикронных частиц [1] (рис.2).

Некоторые статистические характеристики ОЯК, полученные по экспериментальным данным, приведены в табл.1.

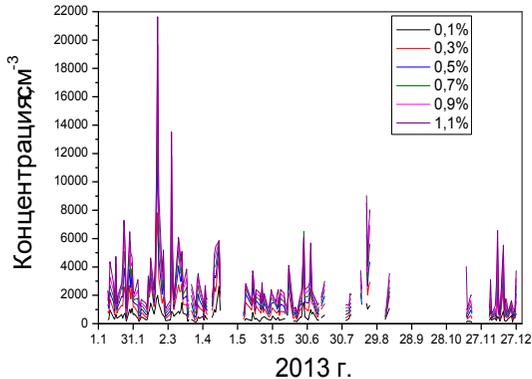


Рис. 1. Изменение концентрации облачных ядер конденсации, активирующиеся при разных пересыщениях водяного пара (%) в 2013 году.

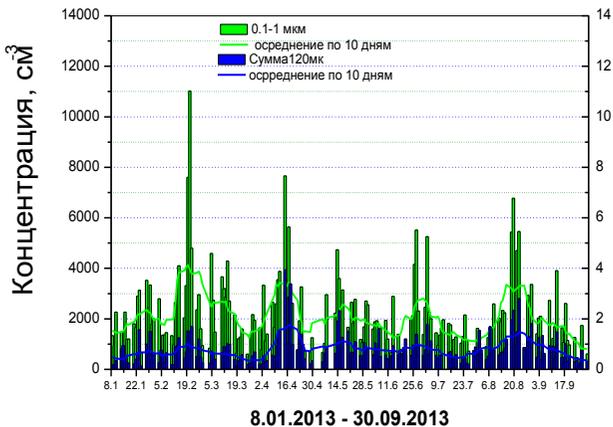


Рис. 2. Изменение концентрации крупных субмикронных частиц 0,1-1 мкм (зеленый цвет) и микронных частиц 1-20 мкм (синий цвет) в январе-сентябре 2013 года (зеленая и синяя линии — скользящее осреднение по 10 точкам).

Таблица 1. Концентрация облачных ядер конденсации в см³ при различных пересыщениях водяного пара в %. Данные прибора CCN-200

Месяц	Пересыщение (%)					
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
Январь	579	1434	2056	2603	3032	3548
Февраль	753	1800	2521	3077	3697	4178
Март	533	1387	2028	2603	3172	3630
Апрель	841	1495	1632	1930	2199	2412
Май	359	921	1309	1569	1774	1974
Июнь	454	1081	1428	1727	1916	2131
Июль	450	1062	1388	1691	1925	2179
Август	787	1766	2475	3074	3622	4115
Сентябрь	-	-	-	-	-	-
Октябрь	-	-	-	-	-	-
Ноябрь	-	-	-	-	-	-
Декабрь	538	1194	1598	1956	2289	2599
Год	542	1274	1768	2179	2552	2944
σ	403	1078	1534	1910	2319	2548
Min	89	262	329	343	473	601
Max	2647	7825	12121	15275	19661	21641

* В сентябре-ноябре данных нет или недостаточно.

Коэффициент вариации концентрации ОЯК практически не зависит от величины пересыщения и составляет 0,75-0,90. Наибольшие концентрации ОЯК в интервале пересыщений > 0,1 % наблюдаются в феврале-марте, характерен всплеск концентрации в середине апреля. Резкое увеличение концентрации ЯК при малых пересыщениях в апреле связано, по всей видимости, со сходом снежного покрова и увеличением концентрации крупных аэрозольных частиц (рис.2).

Теоретически концентрация ОЯК может быть приближенно описано хорошо известным степенным законом [2].

$$N=CS^k,$$

(1)

где S - пересыщение; C и k - параметры, зависящие от воздушной массы, места и высоты измерения.

На рис.3 приведена зависимость концентрации ОЯК от пересыщения, полученная по экспериментальным данным прибора CCN-200 в диапазоне пересыщений 0,1-1,1 %. Для сравнения приведена кривая характерного распределения для континентальных районов. Отдельно приведены кривые для холодного и теплого сезонов.

Наиболее близко экспериментальная кривая аппроксимируется соотношением вида (1), где $C = 2800$, $k = 0,6$.

Полученные коэффициенты k и C отличаются от коэффициентов, характерных для континентальных районов ($k = 0,9$, $C = 4000$). По нашим данным соответственно для холодного и теплого периодов коэффициенты k и C равны 0,7 и 3600 и 0,6 и 2300. Меньшие значения концентрации ОЯК в теплое время года хорошо согласуются с общим уменьшением содержания субмикронного аэрозоля в приземном слое в летние месяцы (рис.3).

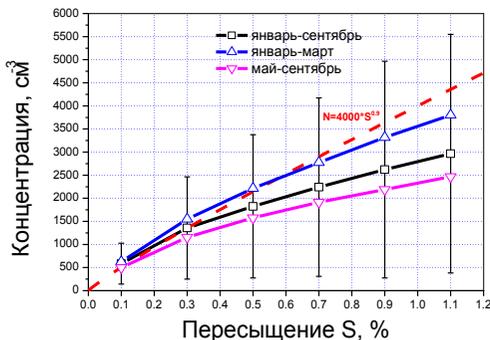


Рис.3. Концентрация активных ядер конденсации в зависимости от пересыщения водяного пара над водой (S). Красная пунктирная линия – типичная концентрация для континентальных аэрозолей, черная - средняя концентрация за январь-сентябрь, синяя - средняя концентрация за январь-март, сиреневая - средняя концентрация за май-сентябрь.

Условия для накопления аэрозолей в приземном слое летом наблюдаются значительно реже, чем зимой, и аэрозольные частицы благодаря восходящим потокам и более интенсивному турбулентному обмену выносятся в более высокие слои тропосферы. С этой точки зрения количество ядер конденсации непосредственно в облаках летом должно несколько возрастать.

Облачные ядра конденсации представляют собой растворимые (полностью или частично) аэрозольные частицы. В случае континентальных облаков это, как правило, крупные микронные или субмикронные частицы с размерами больше 0,1 мкм. Микронные частицы в силу своей малой концентрации (единицы в $см^3$) составляют ничтожную часть ЯК. Исключением служат только случаи с пыльными бурями или очень сильными восходящими движениями, обеспечивающими перенос крупного аэрозоля в верхние слои тро-

посферы. Основное количество ОЯК - это крупные субмикронные частицы от 0,1 до 1 мкм. Неудивительно, что концентрация ОЯК тесно связана именно с концентрацией аэрозольных частиц в этом диапазоне.

Зависимость количества облачных ядер конденсации от концентрации субмикронных частиц наиболее велика в интервале размеров частиц от 0,1 до 1 мкм. Зависимость концентрации ОЯК, измеренной при пересыщении 0,1 и 0,3 % от концентрации этих частиц по данным прибора TSI-3030 приведена на рис 4.

Практически все крупные растворимые ядра активизируются при минимальных пересыщениях (существенно меньше 0,1 %), и дальнейший рост количества ядер конденсации происходит за счет субмикронных частиц. Даже при пересыщении 0,1% крупные ядра составляют не более 1% от активированных ядер. Заметим, что численно количество ядер, активирующихся при пересыщении 0,7 %, почти совпадает с количеством крупных субмикронных частиц в интервале 0,1-1 мкм (2179 и 2109 соответственно). Учитывая, что часть аэрозольных частиц нерастворимы или труднорастворимы, можно утверждать, что при пересыщениях >0,5 % активируется и часть более мелких частиц с размерами 0,05-0,1 мкм.

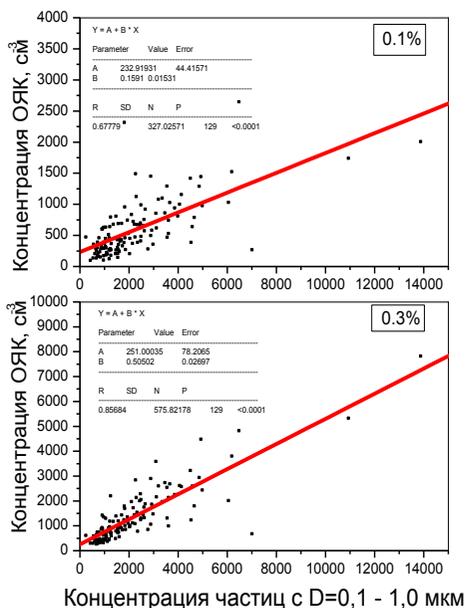


Рис.4. Зависимость концентрации ОЯК от концентрации крупных субмикронных частиц (0,1-1 мкм) при пересыщении 0,1 и 0,3%.

В целом, связь ОЯК с концентрацией субмикронных частиц различных размеров наиболее явно проявляется для интервалов от 0,05–0,5 мкм (рис.5). С увеличением пересыщения наибольшие коэффициенты корреляции ($r = 0,7–0,9$, $a = 0,0001$) наблюдаются для интервалов все более мелких субмикронных частиц, таким образом, при росте пересыщения нижняя граница размеров активных ядер конденсации сдвигается в сторону меньших частиц. Этот вывод вполне соответствует теории. Концентрация наиболее мелких частиц с радиусами $<0,020$ мкм слабо связана с концентрацией ОЯК даже при максимальных приборных пересыщениях ($r = 0,1–0,2$, $a = 0,05$).

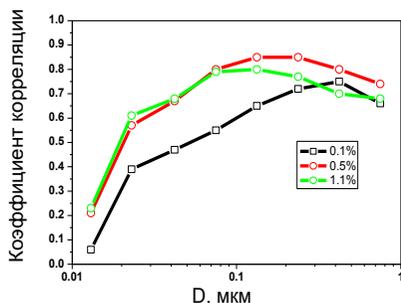


Рис.5. Корреляция концентрации ОЯК с концентрацией аэрозольных частиц (TSI-3030) в логарифмически равных интервалах размеров при пересыщениях 0,1, 0,5, 1,1 %.

Строго говоря, определить нижнюю границу размеров аэрозольных частиц, на которых образуются облачные капли, невозможно, так как нам неизвестен химический состав и растворимость аэрозольных частиц. Активность той или иной аэрозольной частицы как потенциального ядра конденсации зависит от ее растворимой части и радиуса. При этом, если насыщающая упругость водяного пара над частицей увеличивается с уменьшением ее радиуса, то ее растворимость, наоборот, уменьшает пересыщение, необходимое для ее активации, за счет понижения насыщающей упругости над раствором.

Список литературы

1. Плауде Н.О., Стулов Е.А., Паршуткина И.П., Сосникова Е.В., Монахова Н.А. Характеристики атмосферного аэрозоля в Московском регионе в обычных условиях и при лесных пожарах. - М.: Научный мир, 2013. - 80 с.
2. Роджерс Р.Р. Краткий курс физики облаков. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - 231 с.

3. Pruppacher H.R., Klett J.D. Microphysics of clouds and precipitation. – Dordrecht, Holland, D. Reidel Publ. Comp., 1980. - 714 p.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ КРИТЕРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ И КРУПНОГО ГРАДА

А.М. Абшаев, М.Т. Абшаев

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик,
<abshaev@mail.ru>

Современные автоматизированные МРЛ с доплеровской и поляризационной обработкой информации обеспечивают измерение множества характеристик радиоэха облаков и реализацию различных методов обнаружения града, основанных [1]:

- на частотной зависимости рассеяния радиолокационного излучения гидрометеорами;
- деполяризации отраженного сигнала, связанной с несферичностью и диэлектрической неоднородностью гидрометеоров;
- доплеровском сдвиге частоты радиоэха, связанном с движением гидрометеоров;
- зависимости интенсивности радиотеплового излучения гидрометеоров от их размера, фазового состояния и температуры.

Применение последних двух физических принципов обнаружения града здесь не рассматривается, так как они малопригодны для оперативного применения.

1. Одноволновые методы

Наиболее простыми радиолокационными показателями градоопасности облаков являются параметры, указывающие на наличие в них важнейших условий образования града: высокое водосодержание переохлажденной части и большая высота облака, необходимая для появления ледяной фазы. Наличие этих условий в облаке наилучшим образом характеризуют *максимальная радиолокационная отражаемость* (Z_m , dBZ), характеризующая наличие высокой водности; *высота верхней границы повышенного радиоэха* над уровнем изотермы 0°C (ΔH_{45} , км), свидетельствующая о расположении зоны повышенной водности в слое роста града; *высота верхней границы облака* над уровнем изотермы 0°C (ΔH_B , км).

Вероятность выпадения града повышается с увеличением значений Z_m , ΔH_{45} и ΔH_B , измеренных на 10см диапазоне волн [1]. На стадиях образования, роста и начала выпадения града значения Z_m увеличиваются и превышают 50dBZ, достигая в случае очень крупного града 75dBZ, а значения ΔH_{45} обычно превышают 3км, а на стадии завершения выпадения града значения ΔH_{45} могут быть и менее этого значения. Поэтому для успешной оценки градоопасности облаков необходимо использовать комплекс параметров, а также учитывать тенденцию развития облаков, определяемую тенденцией роста (уменьшения) значений Z_m и ΔH_{45} и других показателей градоопасности, приведенных ниже.

1.1. Вероятностно-статистические методы

Несмотря на высокую информативность Z_m , ΔH_{45} , ΔH_B и других производных параметров ни один из них не может однозначно разделить градовые и ливневые облака, так как имеются области неоднозначности, в которых могут наблюдаться и те, и другие. Для устранения этой неоднозначности нами ранее было предложено использовать комплекс параметров, и на основе теоремы вероятности несовместных гипотез Байеса для пары гипотез «облако градовое» и «облако ливневое» разработан вероятностно-статистический метод расчета вероятности выпадения града P_H [1]. Кроме того, нами и другими авторами для разделения градовых и ливневых облаков были предложены дискриминантная функция, квазилинейная дискриминантная функция, полиномиальные функции и др., суть которых сводится к получению разделяющих функций из линейных, двух-, трех- и многомерных комбинаций комплекса радиолокационных параметров кучево-дождевых облаков, включающих Z_m и набор геометрических (ΔH_{45} , ΔH_B , H_B , $\Delta H_B/H_B$) и температурных ($t_{\Delta H_{45}}$, t_{H_B}) характеристик. Однако, несмотря на возможность автоматизации необходимых измерений в настоящее время на практике противорадовых работ применяются более простые критериальные методы.

1.2 Критериальный метод

Наиболее простыми для оперативного применения являются следующие методы оценки вероятности выпадения града P_H :

а) на основе измеренных значений параметров Z_m и ΔH_{45} с помощью рис.1а;

б) на основе значений произведения $Z_m \cdot \Delta H_{45}$ с помощью рис.1б.

Произведение $\Delta H_{45} \cdot Z_m$ характеризует наличие высокого содержания воды в области отрицательных температур (т.е. в зоне роста града). Вероят-

ность выпадения града P_H быстро увеличивается с увеличением произведения $\Delta H_{45} \cdot Z_m$ (рис.1б) в соответствии с выражением:

$$P_H = 1,25(\Delta H_{45} \cdot Z_m) - 145. \quad (1)$$

Облака с $\Delta H_{45} \cdot Z_m > 160$ являются градовыми, а при $\Delta H_{45} \cdot Z_m > 400$ выпадает крупный град.

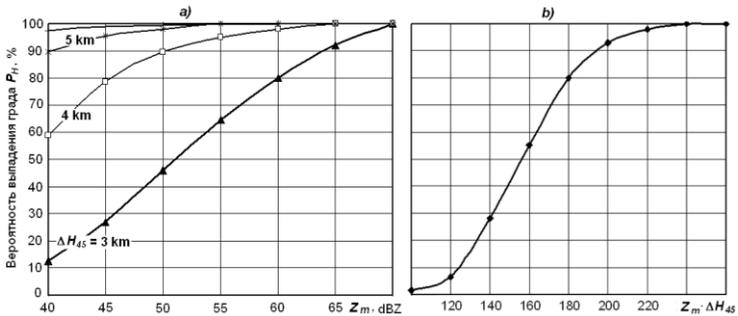


Рис.1. Вероятность выпадения града P_H по значениям Z_m и ΔH_{45} (а) и произведения $Z_m \cdot \Delta H_{45}$ (б).

1.3 Метод карт

Оперативную оценку градоопасности облаков и выделение наиболее опасных в кластере кучево-дождевых облаков можно осуществлять:

а) по картам верхней границы изолиний Z_{45} и Z_{50} , на которых градоопасные облака или их конвективные ячейки (КЯ), имеют высоту $\Delta H_{45} > 3$ км, градовые облака – высоту изолинии ΔH_{50} и $\Delta H_{55} > 3$ км, а сверхмощные градовые облака – высоту $\Delta H_{65} > 3$ км;

б) по карте горизонтального сечения на высоте 3 км над уровнем изотермы 0°C , на которых градоопасные облака или их КЯ выделяются по наличию контура Z_{45} , градовые – по наличию контуров Z_{50} и Z_{55} , а крупной град по наличию контуров Z_{65} и Z_{70} .

в) по карте двухуровневого сечения, представляющей карту Z_m облачного слоя толщиной 5 км выше уровня изотермы минус 6°C с изолиниями Z_{45} , Z_{55} и Z_{65} вблизи поверхности земли:

- градоопасными считаются КЯ, в которых на верхнем уровне выделяется контур Z_{50} ;
- градовыми – КЯ, в которых на верхнем уровне выделяются контуры Z_{55} и Z_{65} .

Совместное отображение в четырех окнах этих карт и карты максимальной отражаемости облака, как показано на рис.2, позволяет надежно и быстро

по ранжировать семейство одновременно наблюдаемых облаков по степени их градоопасности.

Из рис.2а следует, что на карте Z_m выделяются 6 КЯ, которые по отражаемости $Z_m > 50\text{dBZ}$ могут расцениваться, как градовые КЯ. На карте горизонтального сечения на высоте $(H_0 + 3\text{км})$ остаются только 3 градовые КЯ (№ 12, № 16 и № 18), в которых имеются контуры Z_{45} и Z_{50} (рис.2б). На карте верхней границы изолинии Z_{50} (рис.2в) остаются те же 3 градовые ячейки, которые имеют высоту изолинии $Z_{50} > 3\text{км}$. На карте двухуровневого сечения (рис.2г) также выделяются те же 3 градовые ячейки, у которых в переохлажденном слое выделяются контуры $Z_m = 50$ и 55dBZ .

Таким образом, метод карт позволяет оперативно выделить градовые и градоопасные КЯ в многоячейковой облачной системе.

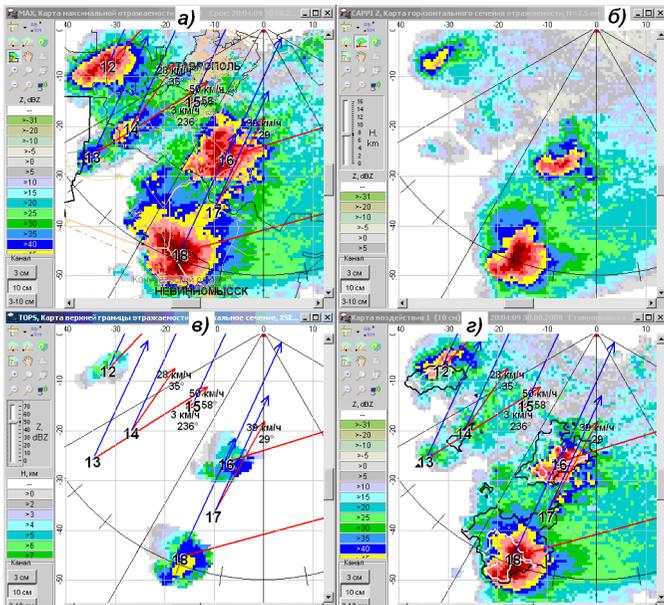


Рис.2. Выделение градовых облаков методом карт: **а)** – карта Z_m , **б)** – карта горизонтального сечения на высоте $(H_0 + 3)$; **в)** – карта высоты верхней границы $Z = 50 \text{ dBZ}$; **г)** – карта двух уровневое сечения.

Оценку степени их градоопасности следует осуществлять путем поочередного просмотра карт горизонтального сечения, начиная от высоты $(H_0 + 3\text{км})$ до $(H_0 + 6\text{км})$. Чем выше обнаруживаются контуры Z_{45} , Z_{50} , Z_{55} , Z_{60} и Z_{65} , тем выше степень градоопасности облака или его КЯ. Наличие контуров Z_{60}

и Z_{65} на высотах ($H_0 + 6$ км) свидетельствует о выпадении крупного интенсивного града.

1.4 Оценка градоопасности облаков по водосодержанию

Автоматизация обработки радиолокационной информации позволяет помимо таких одномерных параметров как Z_m , ΔH_{45} и ΔH_B измерять двумерные и трехмерные параметры, которые могут более адекватно характеризовать градоопасность облаков, имеющих трехмерную структуру [2]. Такими параметрами являются:

- объемы облачности внутри изоконтуров отражаемости $Z > 15, 25, 35, 45, 55$ и 65 dBZ, во всем облачном слое (V_{Z_i} , км³) и переохлажденном слое (ΔV_{Z_i} , км³);
- интегральное водосодержание этих объемов (M_{Z_i} и ΔM_{Z_i} , тонн);
- максимальные значения ($q_{\Sigma m}$ и Δq_{Σ} , кг/м²) и карта распределения интегрированной по всей высоте облака или его переохлажденного слоя (q_{Σ} и Δq_{Σ}).

Наличие в облаке объемов ΔV_{45} , ΔV_{55} , ΔV_{65} свидетельствует о его градоопасности. Приведенная водность и интегральное водосодержание градовых облаков значительно больше, чем в ливневых и слоисто-дождевых облаках [2]. В градовых облаках значение Δq_m обычно превышает 20 кг/м², в ливневых дождях варьирует в пределах от 0,5 до 25 кг/м², а в слоисто-дождевых облаках обычно меньше 1,0 кг/м².

Интегральное водосодержание градовых облаков M_{15} обычно варьирует в пределах от 10^5 до $5 \cdot 10^6$ т, достигая в случае града катастрофической интенсивности $M_{Z_i} \approx 7 \cdot 10^6$ тонн [2].

Наиболее информативными для оценки градоопасности облаков являются параметры Δq_{Σ} , ΔM_{45} , ΔM_{55} и ΔM_{65} , характеризующие водосодержание зоны роста града. Значение $\Delta q_{\Sigma} > 25$ кг/м², $\Delta M_{45} > 5 \cdot 10^5$, $\Delta M_{55} > 5 \cdot 10^4$ и $\Delta M_{65} > 10^2$ тонн встречаются только в градовых облаках. Быстрое выделение градовых и градоопасных облаков может быть выполнено по карте Δq_{Σ} .

На рис. 3а) показана карта максимальной отражаемости Z_{max} , а на рис. 3б), 3в) и 3г) – карты приведенной водности $q_{\Sigma max}$, $\Delta q_{\Sigma 0}$ и $\Delta q_{\Sigma-6}$, соответственно. На карте Z_{max} и карте $q_{\Sigma max}$ отмечается несколько кучево-дождевых облаков, представляющихся достаточно опасными, на карте $\Delta q_{\Sigma 0}$ их меньше, а на карте $\Delta q_{\Sigma-6}$ остаются только мощное градовое облако на юго-востоке и три градовые ячейки одного из облаков на севере.

В работе [8] предложен метод оценки размера града по значению VIL (т.е. по значению q_{Σ}) и плотности VIL, равной $VILD = VIL/H_B$ (рис.4).

Однако, учитывая тот факт, что большой вклад в значения этих параметров могут вносить высокое водосодержание интенсивных осадков в теплом слое, более целесообразно обнаружение града осуществлять по водосодержанию переохлажденного слоя облаков, а не всей их толщи.

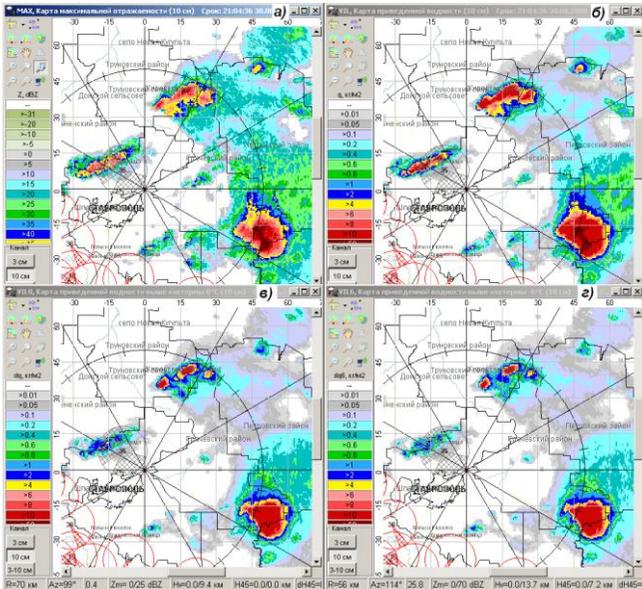


Рис.3. Выделение градовых и градоопасных КЯ градоопасных облаков по картам приведенной водности: **а)** карта Z_m ; **б)** карта приведенной водности всего облачного слоя (Q , $кг/м^2$); **е)** и **з)** такие же карты в облачном слоя выше изотерм $0^{\circ}C$ и $-6^{\circ}C$ (ΔQ_0 и ΔQ_6 , $кг/м^2$).

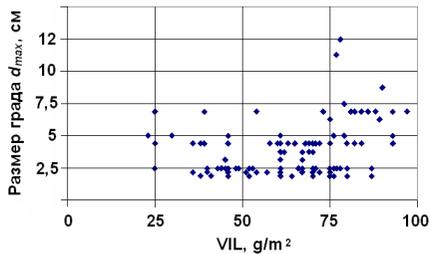


Рис.4. График оценки размера града по значению VIL [7].

2. Двухволновый метод

Радиолокационная отражаемость облаков и осадков зависит от размера, концентрации, диэлектрических свойств гидрометеоров и длины волны. При прочих равных условиях отражаемость на $\lambda = 10$ см в диапазоне размеров рассеивающих частиц от 0,5 до 5 см увеличивается значительно быстрее, чем на $\lambda = 3,2$ см [1 и др.]. Отношение отражаемости на двух длинах волн 3,2 и 10 см при размерах рассеивающих частиц менее 8 мм (в дождях) почти постоянно и равно примерно 100 ± 2 dB и мало варьирует в зависимости от типа гидрометеоров и интенсивности осадков.

При появлении крупных частиц (градин) на фоне дождя это отношение резко уменьшается. Эта зависимость отражаемости от размера гидрометеоров и длины волны дает возможность обнаружения града и выделения градиц градового очага.

Градовые очаги выделяются по критериям $\Delta Z = (Z_{3,2} - Z_{10}) < 3$ dBZ и $Z_{10m} > 45$ dBZ. Значение ΔZ позволяет выделить область крупных частиц, а критерий $Z_{10m} > 45$ dBZ отсекает снегопады, в которых размер хлопьев снега могут достигать 3 см, но значение $Z_m \leq 45$ dBZ [1].

Оптимальными длинами волн для двухволнового обнаружения града являются $\lambda_i = 3,2$ см, и $\lambda_j = 10$ см [1]. На этих длинах волн теоретические и экспериментальные значения ΔZ варьируют в дождях и граде в зависимости от размера частиц в пределах $-23 \leq \Delta Z \leq 4$ dB.

С увеличением максимального размера града d_{max} от 0,8 до 5,0 см значение ΔZ уменьшается на 27 dBZ. Это позволяет оценить размер града по формулам:

$$d_3 = 0,583 \cdot 10^{0,027(Z_{10} - Z_{3,2})}; \quad (2)$$

$$d_{max} = 1,33 \cdot 10^{0,027(Z_{10} - Z_{3,2})}. \quad (3)$$

При точной калибровке 3,2 и 10 см каналов двухволнового радиолокатора МРЛ-5 и введении коррекции на ослабление на $\lambda = 3,2$ см этот метод обеспечивает получение карты изолиний размера града, повышение точности измерения кинетической энергии града, интенсивности и количества осадков по сравнению с одноволновым методом [1].

3 Поляризационный метод

Поляризационные характеристики радиоэха, включая: линейное деполаризационное отношение L_{DR} , дифференциальная отражаемость Z_{DR} , удельная дифференциальная фаза K_{DP} и коэффициент взаимной корреля-

ции $|\rho_{HV}|$, позволяют оценить вид гидрометеоров и обнаружить град на фоне дождя [4-5], так как:

- значение L_{DR} варьирует в дождях в пределах $-27 < L_{DR} < -34$ dB, в граде $-20 < L_{DR} < -10$ dB, а в снеге $-13 < L_{DR} < -18$ dB (рис.4а);
- значение Z_{DR} в ливневом дожде варьирует в пределах $0 < Z_{DR} < 4$ dB, а в граде в пределах $-0,5 < Z_{DR} < 0,5$ dB (рис.4б).
- значение K_{DP} в дождях варьирует от 0 до 10, а в граде от -1 до 1;
- значение $|\rho_{HV}|$ в дождях обычно больше 0,95, а в граде $\approx 0,9 - 0,95$.

Однако на рис.4 можно видеть наличие неоднозначности разделения поляризационным методом областей дождя и града (сухого и обводненного), мелких и крупных капель дождя, крупы и снега. Малые различия значения Z_{DR} в областях мокрого града и дождя (от -2 до 2dB), сухого, гигантского града и крупы приводят к неопределенности (рис.4а), которая разрешается в большей степени по значению отражаемости Z , а не по значению Z_{DR} (рис.4б).

Возникают подобные проблемы однозначности идентификации града и дождя по значениям K_{DP} и $|\rho_{HV}|$. Поэтому для обнаружения града рекомендуется [4-5] сочетание следующих критериев: $Z_m > 55$ dBZ; $-0,5 < Z_{DR} < 2,5$ dB; $0,7 < K_{DP} < 0,95$; $|\rho_{HV}| < 0,95$.

Для более адекватного разрешения этих неоднозначностей в [5] предложен метод нечеткой логики, основанный на построении по экспериментальным данным функций принадлежности значений поляризационных характеристик радиоэха (L_{DR} , Z_{DR} , K_{DP} , $|\rho_{HV}|$ и Z) к тому или иному виду гидрометеоров. Построен классификатор вида гидрометеоров [5], рекомендуемый для применения в системе оповещения об опасных явлениях США.

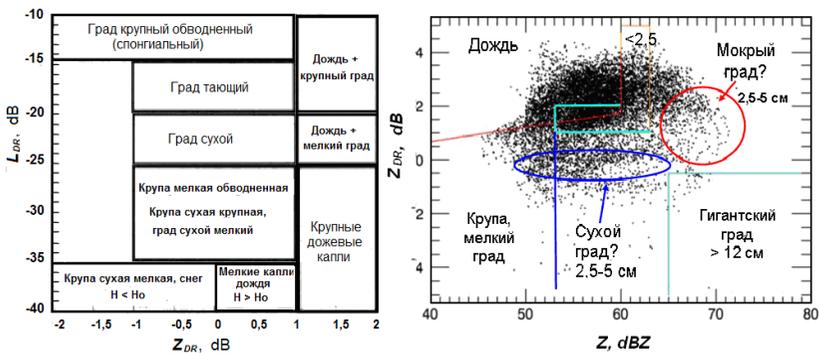


Рис. 4. Распознавания вида гидрометеоров по значениям Z_{DR} и L_{DR} (а) и значениям Z и Z_{DR} [4].

4 Критерии распознавания крупного града

4.1 Высокоинформативными указателями выпадения крупного града являются характерные особенности в структуре радиоэха градовых облаков:

а) наличие навеса мощного радиоэха (иногда со свесом), покрывающего обширную область слабого радиоэха (а), свидетельствующего о наличии мощной струи восходящего потока и возможности длительного нахождения зародышей града в слое роста града;

б) наличие крюка радиоэха (с высокими градиентами отражаемости в приземном слое), окаймляющего восходящий поток и свидетельствующего о наличии зоны конвергенции и вращения восходящего потока (б);

в) наличие радиального выступа (шипа) радиоэха за градовым очагом на средних высотах протяженностью от 10 до 30км (рис.6). Этот выступ с $Z_{10} < 30\text{dBZ}$ формируется за счет тройного рассеяния радиолокационного излучения [6]: в градовом очаге рассеяние вперед с отклонением к земле, потом отражение от земли в направлении градового очага и, наконец, рассеяние градовым очагом в направлении МРЛ (т.е. градовый очаг → земля → градовый очаг → МРЛ). По мере тангенциального смещения облака относительно МРЛ этот выступ также смещается, всегда располагаясь за градовым очагом радиально от МРЛ.

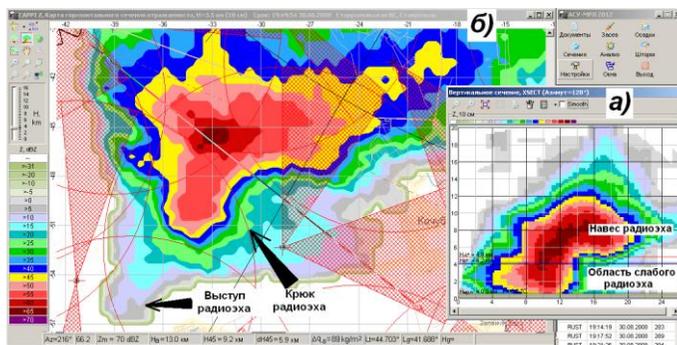


Рис. 5. Характерные особенности структуры градового облака с крупным градом: навес мощного радиоэха, крюк и выступ радиоэха.

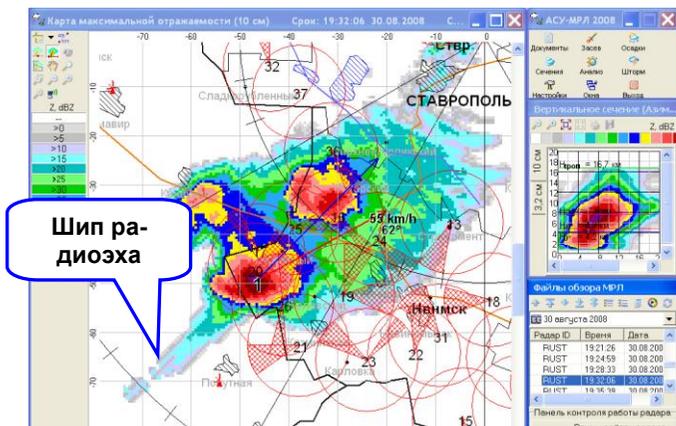


Рис. 6. Выступ (шип) радиозеха мощного градового облака. Северный Кавказ, 30.08.2008 г.

4.2. В службы погоды Австралии для обнаружения крупного града используется «Градовая номограмма» (рис.7), по которой идентификация града размером больше 2, 4 и 6см осуществляется в зависимости от высоты изохзо $Z = 50\text{dBZ}$ и высоты изотермы 0°C .

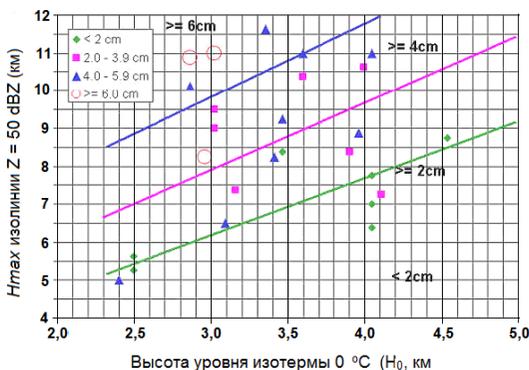


Рис.7. «Градовая номограмма» применительно к области Сидней в Австралии.

4.3. В США в системе оповещения об опасных явлениях WDSS используется алгоритм HDA (Hail Detection Algorithm), предусматривающий отображение размера града на фоне радиозеха. Размер града рассчитывается путем интегрирования потока кинетической энергии града выше уровня H_0 с весовыми коэффициентами, зависящими от высот H_0 и H_{20} . При этом в оценке размера града основное значение имеет высокая отражаемость, в слое роста града.

4.4. На основе вышеизложенного для распознавания мелкого, среднего и крупного града на практике ПГЗ могут быть рекомендованы критериальные значения радиолокационных характеристик, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Критерии мелкого, среднего и крупного града.

Радиолокационные параметры	Мелкий град, $d_{max} < 1\text{см}$	Средний град, $1 < d_{max} < 3\text{см}$	Крупный град, $d_{max} > 3\text{см}$
Z_m , dBZ	45 ÷ 55	55 ÷ 65	> 65
ΔH_{45} , км	3 ÷ 4	4 ÷ 7	> 6
ΔH_{55} , км	1 ÷ 3	2,5 ÷ 6	> 5
ΔH_{65} , км	0	1 ÷ 3	> 2,5
$Z_m \cdot \Delta H_{45}$	140 ÷ 180	180 ÷ 400	> 400
Q , кг/м ²	20 ÷ 40	35 ÷ 80	> 70
ΔQ_0 , кг/м ²	15 ÷ 35	30 ÷ 70	> 50
ΔM_{45} , тонн	$10^4 \div 3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6$	> 10^6
ΔM_{55} , тонн	$10^3 \div 10^5$	$10^5 \div 10^6$	> $5 \cdot 10^5$
ΔM_{65} , тонн	0	$10^3 \div 5 \cdot 10^4$	> $5 \cdot 10^4$
$Z_{10} - Z_{3,2}$, dBZ	0 ÷ 5	5 ÷ 15	> 15
Z_{DR} , dB	< 0	-0,5 ÷ 2,0	0,5 ÷ 2,3
L_{DR} , dB	-30 ÷ -20	-25 ÷ -15	-20 ÷ -10
K_{DP} , °/км		-1 ÷ 1	0,7 ÷ 0,95
$ \rho_{HV} $		0,9 ÷ 0,95	< 0,95

Заключение

С учетом возможностей и ограничений, присущих радиолокационным наблюдениям [3], предложены удобные для оперативного применения методы:

- расчета вероятности выпадения града по значениям Z_m , ΔH_{45} , произведению $Z_m \cdot \Delta H_{45}$;
- оценки градоопасности облаков методом радиолокационных карт;
- обнаружения крупного града по структуре радиоэха и значениям одномерных, двумерных, трехмерных и поляризационных характеристик радиоэха.

Список литературы

1. Абшаев М.Т. Радиолокационное обнаружение града // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1982. – Том 18, № 5. – С. 483 - 494.
2. Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. – 279 с.
3. Абшаев М.Т., Абшаев А.М. Возможности и ограничения радиолокаци-

онных метеорологических измерений//Труды II Всерос. научной конф. «Проблемы военно-прикл. геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб. 2012. Том. I. – С. 276-288.

4. Bringi, V.N., and V. Chandrasekar. Polarimetric Doppler Weather Radar. Principles and Applications. – Cambridge University Press, 2001. – 636 p.

5. Picca J., Ryzhkov A. Polarimetric radar discrimination between small, large, and giant hail at S-band. – Final 2011-Tsk1-Hail, 2011. – 14 p.

6. Zrnic D.S. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value. – Radio Sci., 1987. – No 22. – P. 76–86.

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЛАСТИ БУДУЩЕГО ГРАДООБРАЗОВАНИЯ

М.В. Жарашуев

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,

г. Нальчик, mgk777@mail.ru

Введение

В связи с тем, что градобития наносят большой урон народному хозяйству, еще в СССР с 1956 г. под руководством профессора Сулаквелидзе Г.К. начали вести интенсивные исследования в области изучения механизмов образования осадков: изучались процессы кристаллизации переохлажденных облаков, обосновывались методы внесения реагентов, проводились радиолокационные исследования облачности. В результате многолетних исследований было предложено несколько физических концепций активного воздействия на градовые процессы [1]:

1. **Полная кристаллизация** переохлажденной части облака.
2. **Теория конкуренции**, предусматривающая увеличение концентрации зародышей града с целью замедления роста града за счет конкуренции за жидко-капельную влагу (Сулаквелидзе, 1963).
3. **Укрупнение капель с последующим их замораживанием** с целью создания большой концентрации конкурирующих зародышей града (Бартишвили, Ломинадзе и др., 1964).
4. **Ускорение осадкообразования** из областей будущего градообразования (Абшаев, 1966).

5. **Понижение траектории градин** с целью ухудшения условий для их роста (Browning and Foote, 1977).

6. **Динамическое воздействие** с целью подавления восходящего потока (Вульфсон и Левин, 1967; Серегин, 1981).

На сегодняшний день физической основой современной российской технологии противоголодовой защиты является концепция ускорения осадкообразования из областей будущего градообразования [1].

Эта концепция предусматривает стимулирование более раннего и быстрого осадкообразования в областях будущего градообразования, чем при естественном ходе процесса, так как сокращение времени формирования осадков нарушает баланс скоростей, необходимый для поддержания зародышей града в зоне роста. Это достигается путем создания в областях нового роста начальной концентрации льдообразующих частиц $1010-1011 \text{ м}^{-3}$, приводящей к высокой концентрации ледяных кристаллов, их агрегации, обзёрнению за счет захвата облачных капель и образованию снежной крупы через 6-8 минут после засева. Преждевременное выпадение этой крупы в областях слабых восходящих потоков может оказать серьезное микрофизическое и динамическое воздействие на облако, включая вымывание облачной воды, торможение слабых восходящих потоков и их выхолаживание при таянии крупы ниже изотермы 0°C .

На сегодняшний день существует множество автоматизированных систем, с помощью которых ведутся наблюдения за метеорологическими процессами. Но все же до сих пор воздействие на градовые процессы осуществляется в полуавтоматическом режиме. Главной проблемой, стоящей перед разработчиками программного обеспечения является отсутствие возможности автоматического определения и выделения области засева. На основе метода автоматической идентификации конвективных ячеек [1] и физической концепции воздействия на градовые процессы мною была разработана методика автоматического выделения и измерения параметров непосредственно области воздействия. Данная концепция позволит в дальнейшем не только существенно продвинуться на пути к полной автоматизации воздействия на градовые процессы, но и существенно подкорректировать существующую методику оценки эффективности воздействия.

Оборудование, программа и методика проведения исследований

Радиолокатор МРЛ-5, работающий на длине волны 10 см, был расположен в пригороде Ставрополя ($45,11^{\circ}$ с.ш., $42,106^{\circ}$ в.д., высота над уровнем моря 453 м). При работе радиолокатора применялось программное обеспечение «АСУ-МРЛ» [5,7], которое формирует объемный файл обзора с дискретом по азимуту 1 градус, по углу места 0,52 км и 18 углам места. По этой

же системе проводилось активное воздействие на исследуемые градовые процессы. Под объемным файлом обзора понимаются первичные данные, полученные в результате сканирования локатором пространства с определенным дискретом по азимуту, углу места и дальности. В различных автоматизированных системах используются различные дискреты, алгоритмы и методики расчета отражаемостей, которые учитывают различные поправки на ослабление сигнала, кривизну земли, потерю сигнала в волновом тракте локатора и т.д. [7]. Каждая автоматизированная радиолокационная система имеет собственный формат первичных данных, которые не воспринимаются другими системами, так как они скрыты и не предоставляются общественности. Как следствие, каждая автоматизированная система использует собственные алгоритм и механизм отображения радиолокационной информации, предлагая пользователю определенный стандартный набор карт и опций. Пользователь не имеет доступа к первичным данным, а пользуется переработанной информацией, не обладая при этом возможностью вводить изменения в алгоритмы расчета или формировать новые карты. Главным инструментом исследования является новый программный комплекс «АСУ-ГРАД», разработанный специально для этих исследований. Данный комплекс осуществляет считывание и обработку данных различных автоматизированных систем, таких как «АСУ-МРЛ», «АСУ-Антиград», «Мерком». Целью создания нашей системы являются экспериментальные исследования данных метеонаблюдений, внедрение новых нестандартных методик и технологий в противорадовых системах и сравнение данных с различных автоматизированных систем. Для этого мною был раскодирован формат объемных (первичных) файлов обзора от систем «АСУ-МРЛ», «АСУ-Антиград» и «Мерком» и реализован механизм автоматической идентификации конвективных ячеек [2]. На рис.1 представлена карта максимальной отражаемости в системе «АСУ-ГРАД» с выделенными на ней красным цветом и пронумерованными областями зарождения града.

Любая карта представляет собой, отображение земной поверхности в радиусе 208 км от места стояния локатора с расположенными на ней населенными пунктами, с указанием радиусов полета ракет из пунктов воздействия (красные окружности, рис.1), границ районов и т.д., на которую нанесены различные параметры, полученные в результате обработки объемного файла обзора [5,7], в частности, максимальная отражаемость.

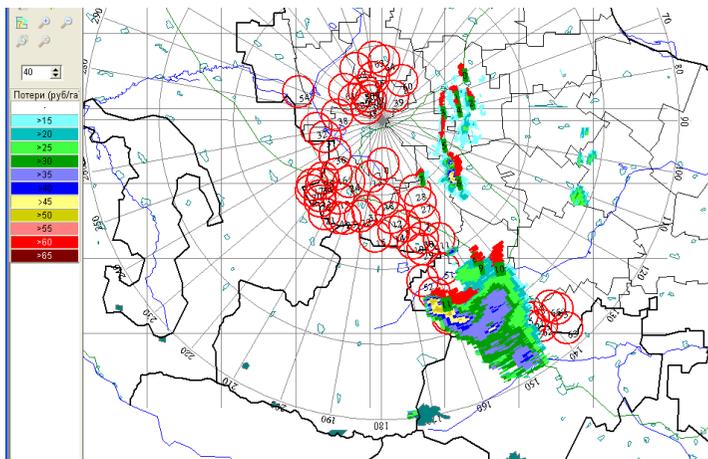


Рис.1. Карта максимальной отражаемости.
Красным цветом выделены области зарождения.

Задача распознавания области засева по существу является задачей распознавания образов и анализа сцен. Учитывая сложность этой задачи (идентификация конвективной ячейки (КЯ) в облачной системе, измерение ее параметров, оценка степени грозо- и градоопасности), предлагается осуществлять ее по следующему алгоритму[2]:

- считывание данных с радиолокатора;
- получение 40 матриц 800×800 значений, соответствующих горизонтальным сечениям с шагом 0,5 км;
- расчет матрицы 800×800 значений, соответствующей высотам максимальной отражаемости в столбе;
- выделение в поле значений максимальной отражаемости радиоэха точек, ограничивающих замкнутые изолинии высот максимальной радиолокационной отражаемости;
- упорядочивание полученных точек, т.е. получение составных частей фидерных облаков;
- объединение составных частей в единые поля замкнутых изолиний H ;
- идентификация областей воздействия, их нумерация в пространстве и в хронологическом порядке зарождения;
- измерение комплекса одно-, двух- и трехмерных параметров каждой фидерной ячейки.

Физическая концепция методики выделения области засева

Как показывает практика, по ходу перемещения градового облака на более низкой высоте, чем само градовое облако, сосредоточены так называемые фидерные облака, имеющие достаточно высокий водозапас [6], которые, подпадая в восходящие потоки движущегося градового облака, затапливаются в верхнюю его часть, где формируется град, и постоянно подпитывают его. Вследствие такой подпитки градовое облако начинает быстро расти в размерах.

Согласно [1,3,4], зоной формирования града является переохлажденная часть области нового роста, где происходит формирование условий для зарождения града (преимущественно конденсационный и зарождающийся коагуляционный рост облачных частиц). Она расположена в фидерных облаках несимметричных градовых ячеек и во вновь развивающихся КЯ одноячейковых процессов в интервале температур $-5 \div -20$ °С и имеет отражаемость $Z10 < 15$ dBZ. Однако, практика показывает, что в зоне формирования отражаемости достигают и 20 dBZ.

Фидерные облака, на которые направлено воздействие с целью создания в областях нового роста начальной концентрации льдообразующих частиц $1010-1011 \text{ м}^{-3}$, стремятся к слиянию с основной конвективной ячейкой, так как располагаются на пути её следования. При этом сила восходящего потока фидерных облаков зависит от силы главного восходящего потока, так как является его составной частью. Логично было бы предположить, что максимальная отражаемость в столбе зоны формирования естественных зародышей будет стремиться к увеличению, так как частицы в процессе движения к верхней части облака под действием силы конвекции, сталкиваясь с более мелкими частицами, увеличиваются в размерах. В результате, чем длиннее путь частицы до слияния с главной конвективной ячейкой, тем больше она произвела столкновений. Вследствие того, что массы частиц в области зарождения небольшие, то высоты, на которые могут подняться наиболее крупные частицы, значительны. В исследованиях менялись пороговые значения высот и пороговые значения отражаемостей. При значениях высот 5,5-6 км и отражаемости 20 dBz наблюдалось 87%-ое совпадение с месторасположением площадок, выделенных в ручном режиме. При этом, в подавляющем большинстве случаев площадь, выделенная в автоматическом режиме, превышала площадь, выделенную в ручном режиме, не более чем на 30 %.

Сравнительный анализ ручного и автоматического выделения области засева

Используя метод автоматической идентификации [2], было проанализировано 173 случая воздействия на градовые процессы, развивавшиеся на территории Ставропольского края. В 141 случае область автоматически выделенных конвективных ячеек более, чем на 80%, соответствовала выделенным в ручном режиме. При этом эффективность воздействия Ставропольской ВС в периоды, из которых выбирались исследуемые случаи воздействия, а именно с 2007 по 2011 гг., не опускалась ниже 95%. Анализ этих процессов позволил выявить оптимальную формулу для автоматического выделения области засева. Область засева можно считать оптимальной при высоте максимальной отражаемости в столбе выше 5-5,5 км. В целом данная методика показала, что в подавляющем большинстве случаев наблюдается почти полное сходство результатов (рис.2). На рис.2 слева приводится картинка автоматического выделения красными полосами области воздействия, а справа реально проведенное воздействие за тот же цикл обзора в ручном режиме Ставропольской ВС.

Также бывают случаи, когда данные ручного выделения области воздействия (рис.3) существенно отличаются от данных автоматического выделения. В большинстве случаев расхождение являлось следствием ошибочного выделения области воздействия именно в ручном режиме. Как показано на рисунке 3а, область засева захватила и левую часть верхнего облака. На рис.3 б, в видно, что зона навеса радиоэха находится не слева, а между облаками, что и распознал автоматический метод. Ввиду того, что облако находилось на выходе защищаемой зоны, то воздействующим не оставалось ничего, кроме обстрела, насколько это возможно для зоны близкой к реальной зоне воздействия.

Выводы

С использованием радиолокационной информации на основе метода автоматической идентификации конвективных ячеек был разработан новый метод обнаружения и распознавания фидерных облаков, которые являются объектами воздействия. В основе метода лежит карта высот максимальной отражаемости и рассчитанные на ее основе параметры. Выведено оптимальное значение определения площадки засева для Ставропольского края (высота максимальной отражаемости более 5 км при отражаемости менее 20 dBz). Данная методика применима для корректировки существующей оценки физической эффективности и автоматизации воздействия на градовые процессы.

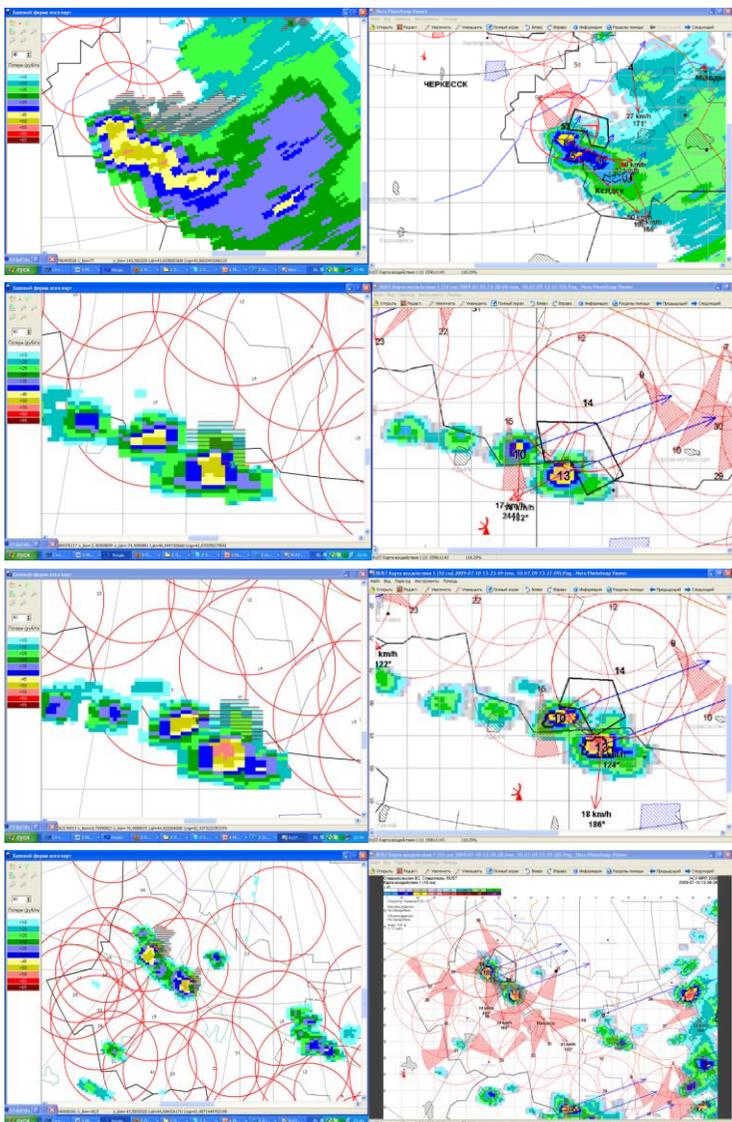
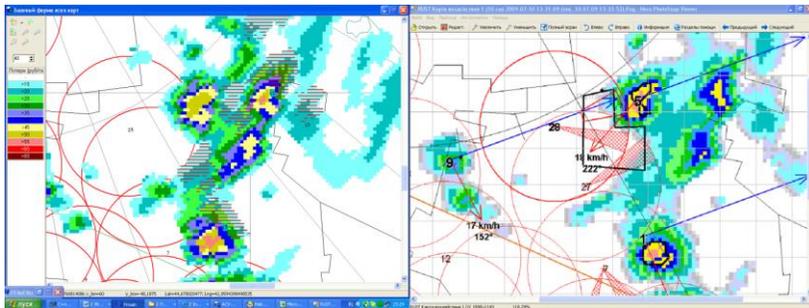
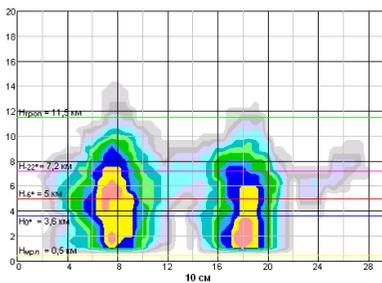


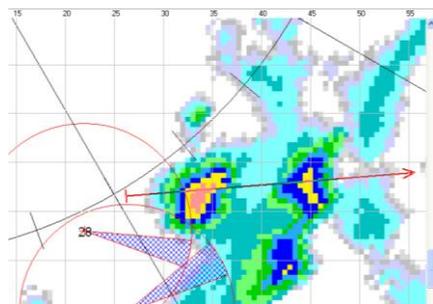
Рис.2. Слева – автоматически выделенные области засева, справа – ручное реальное воздействие на эти же ячейки.



а)



б)



в)

Рис.3. а) Реальное воздействие (справа), автоматическое выделение (слева), б) вертикальный разрез по высоте, в) вертикальный разрез на плоскости.

Список литературы

1. Абшаев М.Т. Новый метод воздействия на градовые процессы // Труды Всес. конф. по АВ на гидром. проц. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. С.118-126.
2. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Жарашуев М.В. Автоматизированная радиолокационная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормоповещения//Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 36-45.
3. Абшаев М.Т. Автоматизированные противоградовые комплексы //Труды конф. стран СНГ.– СПб.: Гидрометеиздат, 2002. Т. 5. С. 15-18.
4. Абшаев М.Т. Радиолокационное обнаружение града//Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 5. С. 483-494.
5. РД 52.37.XXX.2008. Методические указания. Порядок применения автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса

«АСУ-МРЛ» в практике штормоповещения и противорадовой защиты. М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев, М.В. Жарашуев.

6. Синькевич А.А., Краус Т.В., Гхулам А.С., Куров А.Б. Исследование характеристик кучево-дождевых облаков большой мощности после воздействия с целью увеличения осадков//Метеорология и гидрология, 2013. № 9. С.5-20.

7. Тебуев А.Д. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации и управления активным воздействием на градовые процессы/Автореф. дисс. кандидата физико-математических наук: 25.00.30. – Нальчик, 2003. - 124 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ И ОКОЛООБЛАЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАССИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Х.М. Калов, Р.Х. Калов

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Введение

Статья посвящена изложению методики и аппаратного комплекса, разработанных и используемых для измерения скорости воздушных потоков V и коэффициента турбулентности K_T в грозоградовых облаках и их окрестности, а также результатов экспериментальных измерений V и K_T радиолокационным способом с использованием пассивных радиолокационных отражателей (ПРО). Описаны цель и задачи исследования, предложена усовершенствованная на основе экспериментальных измерений схема засева мощных градовых облаков кристаллизующим реагентом.

1. Цель и задачи исследования

Целью исследований является усовершенствование схемы засева суперячейковых градовых облаков кристаллизующим реагентом на основе радиолокационно-поляризационных измерений их динамических и турбулентных характеристик.

Эффективность активных воздействий на градовые облака кристаллизующим реагентом AgI с целью предотвращения градобитий зависит от мно-

гих факторов, в частности, от точности определения места внесения реагента, количества реагента на единицу обрабатываемого объема (дозировки) и времени внесения реагента. В свою очередь, эти факторы зависят от термодинамических и микрофизических параметров градовых облаков. Определение динамических параметров (скорости и направления воздушных потоков, турбулентных движений) градовых облаков производится дистанционным, в частности, радиолокационным методом с использованием различных радиолокационных отражателей, запускаемых в исследуемый объем облака. Микрофизические параметры (водность, размеры гидрометеоров и др.) оцениваются по радиолокационным отражаемостям η_{10} , $\eta_{3,2}$, измеренным с помощью МРЛ-5. Место и время внесения кристаллизующего реагента определяются с помощью радиолокационных исследований с учетом температурных уровней и вектора скорости воздушных потоков в обрабатываемом объеме облака. Для обеспечения достаточной концентрации реагента во всем обрабатываемом объеме градового облака необходимо знать коэффициент турбулентности в зоне воздействия (наряду с водностью и концентрацией гидрометеоров), поскольку основным механизмом, разносящим кристаллизующий реагент в зоне воздействия является турбулентная диффузия (молекулярной диффузией можно пренебречь ввиду ее ничтожно малой роли). В качестве ПРО в работе использовались низко модульные углеродные волокна типа «Углен», а также металлизированные пластинки «Фольга» [4-7].

2. Методика и аппаратный комплекс для экспериментальных исследований воздушных потоков

2.1. Экспериментальный аппаратный комплекс включает в себя [4,6,7]:

- метеорологический радиолокатор МРЛ-5, работающий на двух длинах волн – 3,2 и 10 см;
- поляриметр (поляризационная решетка) с пультом программного управления и блоком индикации угла поворота решетки;
- блок многоконтурного изоэха БОМО (блок отображения метеорологической обстановки);
- вычислительный комплекс 15 ВУМС - 28 - 025;
- метеорологическая ракетная пусковая установка;
- метеорологическая ракета "Облако" со специально разработанной разделяющейся головкой для доставки ПРО в облако;
- ПРО двух видов: «Углен» и «Фольга»; средства связи.

2.2. Методика проведения эксперимента

Измерения начинаются с момента обнаружения облаков в зоне действия ракетной пусковой установки в радиусе 15-20 км. Перед началом каждого цикла измерений параметров ПРО производится фотосъемка структуры метеорадиоэха с индикатора кругового обзора (ИКО) и индикатора "Дальность - высота" (ИДВ) МРЛ-5. Структура метеорадиоэха от облаков отражается на стандартных экранах РЛС после предварительной обработки сигнала аппаратурой БОМО по одному из частотных каналов радиолокационной станции при соответствующей стандартной поляризации антенны.

В дальнейшем операции проводятся в следующем порядке:

- определяются координаты места внесения ПРО в облачное или околооблачное пространство;
- по таблицам стрельб вырабатываются команды для запуска ракет "Облако" со специальной разделяющейся головкой;
- непосредственно перед запуском ракеты в азимуте стрельбы производится фоторегистрация вертикального разреза структуры метеорадиоэха;
- сканируя антенной МРЛ-5 по углу места в пределах заданного азимута, выделяются характерные для ПРО радиоэхо на фоне метеорадиоэха;
- измерения координат ПРО производятся через каждые 1-3 мин, строится траектория движения отражателей и вычисляются их скорости;
- определяются площади горизонтальных и вертикальных сечений радиоэха от ПРО для последующего вычисления коэффициента турбулентности.

3. Результаты экспериментальных измерений скорости воздушных потоков и коэффициента турбулентности в градовых облаках и их окрестностях

3.1. Результаты радиолокационных измерений скорости воздушных потоков

За время проведения комплексного градового эксперимента в ВГИ нами был проведен 21 натурный эксперимент с запуском метеорологических ракет «Облако» снаряженных ПРО, с целью исследования воздушных потоков и турбулентности в облаках и околооблачном пространстве. Из них 4 запуска ракет с ПРО осуществлено в максимум отражаемости метеорадиоэха, 8 - в навес и впереди навеса на удалении 2-4 км, 1 - на границу навеса и околооблачной среды, 1 - в верхнюю часть слоисто - кучевого облака, 7 - в околооблачное пространство (2 из них в чистую безоблачную атмосферу).

Приведем для примера 3 эксперимента:

1. 21 июля 1985 г. ракета «Облако» с ПРО «Фольга» запускалась в безоблачную атмосферу (рис.1).

2. 21 июня 1985 г. ракета «Облако» с ПРО «Углен» запускалась в градное облако (над градным очагом) (рис.2).

3. 27 июня 1986 г. ракета «Облако» с ПРО «Фольга» запускалась в градное облако (над зоной осадков) (рис.3).

Опыты по исследованию распространения ПРО в свободной атмосфере проводились 21 июля 1985 г. В 19 ч 17 мин (азимут $A=210^\circ$) на высоте $H = 6$ км был произведен запуск ракеты «Облако» с ПРО «Фольга» из ленточек размерами 50×2 мм и толщиной 0,01 мм. Вес выбрасываемого пакета, состоящего из 10^4 шт. лент, составлял 30 г. Первое радиоэхо от облака ПРО было обнаружено на высоте $H = 5,1$ км (азимут 219°) в 19 ч 24 мин. На рис.1 дана серия изображений, показывающих оседание облака ПРО в вертикальном направлении для различных азимутов. Каждое элементарное облачко при одном и том же азимуте фиксировалось через 1-2 мин.

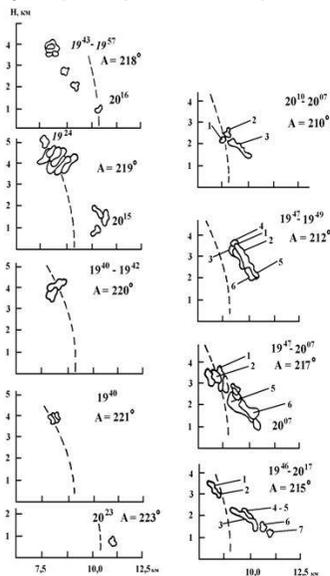


Рис.1. Оседание ПРО в свободной (безоблачной) атмосфере. 21.07.85г. Радиоэхо «облака» ПРО в различные моменты времени.

A – азимут, цифры (1-7) со стрелками показывают места измерения поляризационных параметров радиоэха ПРО.

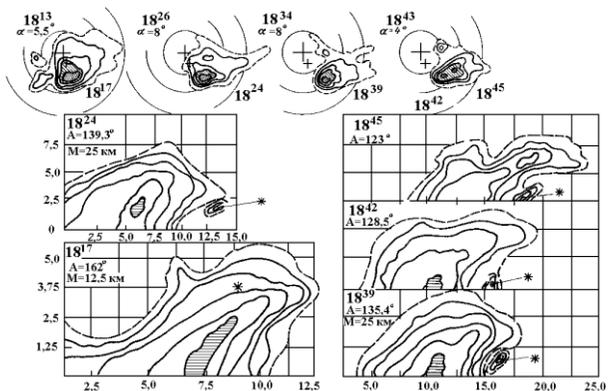


Рис.2. Запуск ПРО «Углен» в градовое облако (21.06.85г.).
 Изолинии радиозха градового облака на ИКО (4 верхних рис.) и
 ИДВ (5 нижних рис.). 18¹³ – время измерения,
 А – азимут, М – масштаб, * - ПРО.

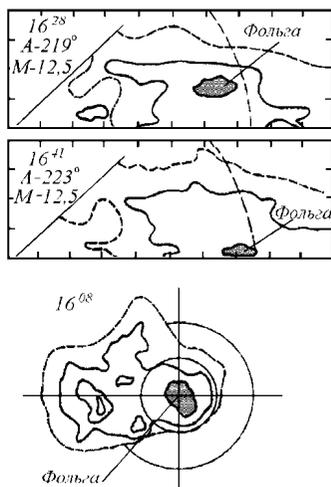


Рис.3. Выделение радиозха ПРО «Фольга» на фоне изолиний отражаемости ливнево-го облака. 27.06.86 г. Траектория перемещения «Фольги» на фоне структуры метеоро-радиозха ливневого облака на ИКО и ИДВ. Фото выполнены для круговой поляриза-ции II канала МРЛ-5.
 А – азимут, М – масштаб, 16²⁸ – время.

Из анализа рис.1 можно сделать вывод, что диполи увлекаются воздуш-ным потоком равномерно и перемещаются в пространстве достаточно ком-пактной группой. Это происходит из-за того, что ленты незначительно отли-

чаются друг от друга геометрическими размерами, обладают одинаковыми аэродинамическими свойствами и не соединяются между собой при падении. Это свойство очень важно при зондировании внутриоблачного пространства, так как облака таких ПРО долго сохраняют радиолокационную отражаемость, близкую к максимальной. Это позволяет дипольным отражателям незначительно менять поляризационные свойства, присущие им при взаимодействии с облачной средой.

Скорость вертикального оседания фольги составляет около $1,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, она была рассчитана для перемещения ПРО при азимуте 219° , где время $t_{\text{нач}}=19 \text{ ч } 24 \text{ мин}$ и $t_{\text{кон}}=20 \text{ ч } 09 \text{ мин}$ для высоты, близкой к $1,0 \text{ км}$. Последнее радиоэхо от облака ПРО было обнаружено в $20 \text{ ч } 23 \text{ мин}$, т.е. немногим больше 1 ч после запуска ракеты.

Подобные эксперименты были проведены с ПРО типа «Углен». Скорость оседания облака диполей равна $0,6\pm 0,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Максимальная радиолокационная отражаемость 320-граммового пакета угольных нитей составляла порядка $4,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$.

Из проведенных опытов по селектированию дипольных отражателей типа «Углен» и «Фольга» приведём два эксперимента. 21 июня 1985 г. градовый процесс проходил над территорией НИП в непосредственной близости от точки наблюдения в радиусе действия ракетной установки. В $18 \text{ ч } 17 \text{ мин}$ был произведен запуск ракеты с ПРО типа «Углен» (азимут 162° , дальность $8,5 \text{ км}$) на высоту $4,5 \text{ км}$. На рис 2 отмечено место внесения ПРО в облако.

«Углен» имел длину 5 см , вес пакета составлял 320 г . В $18 \text{ ч } 24 \text{ мин}$ (азимут $139,3^\circ$, $H \approx 2,2 \text{ км}$) было обнаружено облако ПРО. Установить наличие углеродных волокон в облаке удалось с помощью поляризационных измерений. На серии снимков ИДВ показано перемещение облака диполей в вертикальном направлении. На изображенном ИКО показано месторасположение ПРО на фоне структуры метеорадиоэха в различные моменты времени и их перемещение в градовом облаке.

27 июня 1986 г. в $16 \text{ ч } 25 \text{ мин}$ (азимут 220°) был произведен запуск ракеты «Облако», снаряженной 30 г «Фольги». В $16 \text{ ч } 28 \text{ мин}$ (азимут 219°) было обнаружено облако ПРО. На серии изображений ИКО и ИДВ, снятых на круговой поляризации с ослаблением порядка 12 дБ (рис 3), показана траектория перемещения выделенной зоны. ПРО оседали вместе с осадками в течение 13 мин , немного перемещаясь в направлении движения облака.

Проведенные эксперименты подтверждают возможность выделения ПРО на фоне различных метеорадиоэхо с помощью поляризационной селекции.

При проведении анализа результатов экспериментов нами привлекались и данные, полученные другими исследователями по литературным источникам, в частности, результаты исследований в ВГИ [1-3]. Над вершиной Св облака и вокруг него до расстояний 20-30км наблюдаются нисходящие потоки со скоростями от нескольких сантиметров до $20\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. В области максимума отражаемости от облака ПРО перемещаются вместе с облаком, немного опережая его, доходят (ПРО) до навеса метеорадиоэха и оседают со скоростью $1\div 5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Скорости нисходящих потоков в диссипирующем облаке доходят до $30\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Под развивающимися конвективными облаками отмечаются токи, направленные от зон радиолокационного отражения. В большинстве случаев радиозонды и шар - пилоты, запущенные на некотором расстоянии от облаков, обтекают их, а при наличии одновременно нескольких облаков перемещаются между ними, не входя ни в одно из них. Вток воздуха в облако наблюдается, в основном, через его нижнее основание.

Натурные эксперименты с использованием пассивных радиолокационных отражателей для исследования направления и скорости воздушных потоков в конвективных облаках и их окрестностях показали, что в максимуме отражаемости метеорадиоэха, в навесе радиоэха и впереди навеса, а также на границе навеса радиоэха нет втока воздуха в облако. ПРО, внесенные в указанные области облака, перемещаются по направлению ведущего потока от центра облака к навесу радиоэха, одновременно опускаясь вниз с гравитационной скоростью. Такая же картина наблюдается при внесении ПРО в вершинную часть облака. В зависимости от места внесения отражателей, мощности и стадии развития облака скорости перемещения ПРО меняются в широких пределах от нескольких $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ до $17 - 30\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

3.2. Определение коэффициента турбулентности в облаках и их окрестностях с использованием ПРО

Скорость распространения кристаллизующего реагента при проведении активных воздействий на градовые облака зависит от динамических параметров и турбулентности облаков. В качестве параметра, характеризующего степень турбулентности движения облачной среды в заданной точке, используется коэффициент турбулентности K , являющийся функцией координат трехмерного пространства. Прямых методов измерения значений K к настоящему времени не существует.

Используя в качестве примесей пассивные радиолокационные отражатели (ПРО) нами проводились расчеты K по формуле [1]:

$$K = \frac{v(z_0 - z)}{\ln N_z / N_0}, \quad (1)$$

где v - скорость падения частиц примеси; N_0 , N_z – концентрации частиц примеси на высотах z_0 , z , соответственно.

Движение ПРО в облаках и их окрестностях сопровождалось радиолокатором МРЛ-5, определялись через заданные промежутки времени координаты центра радиоэха от ПРО и площадь сечения радиоэха. Таким образом, определяется скорость движения v , вычисляется объем, занимаемый ПРО. Зная количество частиц ПРО ($n=10^4$ частиц), вычисляется концентрация N в каждый момент движения. По этим данным определяется K .

Натурные эксперименты показали, что K зависит от типа градового облака, стадии его развития и места измерения в облаке. В мощных градовых облаках в стадии зрелости $K=400 \div 800 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ в зависимости от места измерения в облаке. Результаты расчетов K приведены в таблице.

Таблица. Значения коэффициента турбулентности K ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) во фронтальной части градового облака на высотах 375÷1200 м за 26 июня 1993 г.

Время измерения, часы, мин	Объем ПРО V в м^3	Высота z в м	Отношение концентрац. N_z / N_0	$\ln \frac{N_z}{N_0}$	Скорость, в $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	K в $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
14 ⁴⁶	2,2·10 ⁷	1200				
14 ⁵⁰	2,8·10 ⁷	800	0,7857	-0,24	2,30	383,3
14 ⁵⁵	5,5·10 ⁷	625	0,4	-0,92	1,98	376,6
15 ⁰¹	6,4·10 ⁷	425	0,3438	-1,06	1,96	369,8
15 ⁰⁶	6,8·10 ⁷	375	0,3235	-1,13	1,83	80,97

Как видно из таблицы, K во фронтальной части градового облака меняется в пределах 81÷383,3 $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ за период измерений с 14 час 46 мин до 15 час 5 мин на высотах 375÷1200 м.

Заключение

1. Разработан радиолокационный метод измерения скорости и направления воздушных потоков в градовых облаках и их окрестностях с использованием пассивных радиолокационных отражателей (ПРО), вносимых в облако метеорологической ракетой “Облако” с разделяющейся головной частью.

2. Разработана методика определения коэффициента турбулентности K в мощных конвективных облаках и их окрестностях на основе радиолокационных измерений геометрических размеров радиоэха от ПРО через заданные промежутки времени (1-3 мин), начиная с момента радиолокационного обнаружения ПРО.

Натурные эксперименты, проведенные нами, показали, что величина K зависит от типа градового облака, стадии его развития и места измерения в облаке. В суперячейковых градовых облаках в стадии роста и зрелости $K=81\pm 380 \text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1}$. Во фронтальной части градового облака K меняется в пределах $81\pm 383,3 \text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1}$, возрастая с увеличением высоты местонахождения ПРО (табл.). Величина K возрастает от периферии градового облака к центру, достигая максимального значения на границе восходящих и нисходящих воздушных потоков (начиная с момента возникновения нисходящих потоков в градовом очаге).

3. Натурные эксперименты, проведенные нами с использованием пассивных радиолокационных отражателей для исследования направления и скорости воздушных потоков в облаках и их окрестностях показали, что в максимуме отражаемости метеорadioзха, в навесе радиоэха и впереди навеса радиоэха нет втока воздуха в облако. ПРО, внесенные в указанные области облака, перемещаются по направлению ведущего потока от центра облака к навесу радиоэха, одновременно опускаясь вниз с гравитационной скоростью. Такая же картина наблюдается при внесении ПРО в вершинную часть облака. В зависимости от места внесения отражателей, мощности и стадии развития облака скорости перемещения ПРО меняются в широких пределах от нескольких $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ до $17\pm 30 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Собственная гравитационная скорость падения ПРО «Углен» составляет $0,6\pm 0,7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, «Фольга» - $0,7\pm 0,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

4. Ранее проведенные исследования показали, что вне суперячейкового облака за изолинией $\eta_{10}=10^{-12} \text{ см}^{-1}$ во фронтальной части (под навесом радиоэха) до удалений от облака $4\pm 6 \text{ км}$, имеют место восходящие потоки со скоростями $1\pm 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ до температурных уровней $-1\pm -10^\circ\text{C}$ и ниже. Внутри облака, во фронтальной части, ограниченной изолинией отражаемости $\eta_{10}=10^{-12} \text{ см}^{-1}$ и зоной выпадения града по горизонтали и изолиниями температур $-12\pm -18^\circ\text{C}$ по вертикали, наблюдаются нисходящие потоки со скоростями $1\pm 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. В этой части облака величины водности составляют $q=0,04\pm 3,54 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$, концентрация гидрометеоров $N=150\pm 5000 \text{ м}^{-3}$ (при критическом диаметре частиц осадков $d_{кр}=1000 \text{ мкм}$), вертикальные скорости воздушных потоков незначительны. Эти условия являются оптимальными для активного воздействия на градовые процессы кристаллизующим реагентом - йодистым серебром. Отсутствие сильных восходящих воздушных потоков благоприятствует тому, что реагент не выносится вверх из зоны воздействия не успев проявить себя как льдообразующее средство. Температура $t=-12\pm -18^\circ\text{C}$ наиболее благоприятна для замораживания водяных капель йодистым

серебром. Наличие твердых ледяных частиц в переохлажденной жидкокапельной части облака приводит к росту первых за счет вторых и водяного пара в облаке.

Исходя из вышеизложенного, рекомендуется вносить кристаллизующий реагент в суперячейковые градовые облака на температурный уровень $-12 \div -20^\circ\text{C}$ во фронтальную часть градового облака, ограниченную по горизонтали изолиниями радиолокационной отражаемости $\eta_{10} = 10^{-9} \div 10^{-11} \text{ см}^{-1}$ (в зону формирования условий зарождения и роста града). Время внесения кристаллизующего реагента определяется моментом формирования крупнокапельной ($d = 10^3 \text{ мкм}$) переохлажденной зоны с концентрациями $N = (1,5 \div 50) \cdot 10^2 \text{ м}^{-3}$ (водность $q = 0,04 \div 3,5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$), что соответствует радиолокационной отражаемости $\eta_{10} = 10^{-9} \div 10^{-11} \text{ см}^{-1}$.

Дозировка реагента зависит от концентрации крупных капель в зоне воздействия. При водностях $q = 1 \div 3 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ концентрации 1000 микронных частиц составляют $N = (19 \div 57) \cdot 10^2 \text{ м}^{-3}$ (или $10^9 \cdot N$ в 1 км^3). Если принять, что выход кристаллов в естественных условиях равен 10^{13} , коэффициент эффективности K , под которым понимается число кристаллов реагента, необходимое для получения одной замерзшей крупной капли, являющейся зародышем градины, составляет 1:500, то на 1 км^3 обрабатываемой облачной зоны потребуется израсходовать $m = (19 \div 57) \cdot 10^2 \cdot 10^9 \cdot 500 \cdot 10^{-13} = 95 \div 285 \text{ г}$ реагента.

Список литературы

1. Бибилашвили Н.Ш., Евстратов В.В., Ковальчук А.Н. Некоторые результаты исследования воздушных потоков в окрестности кучево-дождевых облаков//Тр. ВГИ. 1974. Вып.28. С.27-31.
2. Бибилашвили Н.Ш. Некоторые вопросы методики и результаты исследования характера воздушных потоков в конвективных облаках и в их окрестностях//Тр. ВГИ. 1977. Вып.21. С.104-109.
3. Бибилашвили Н.Ш., Ковальчук А.Н., Чеповская О.И. Некоторые результаты исследования структуры воздушных потоков под развитыми конвективными облаками//Тр. ВГИ. 1977. Вып.34. С.58-66.
4. Богомолов О.С., Калов Х.М., Пашкевич М.Ю. Исследование распространения ПРО в облаке и околооблачном пространстве//Тр. ВГИ. 1989. Вып.76. С.82-87.
5. Гирс С.П. и др. Исследование радиолокационных характеристик углеродных электропроводящих волокон/Гирс С.П., Завируха В.К., Каменцев В.Н., Левин Р.М., Райкин В.П., Степаненко В.Д., Штивельман Д.К.// Тр. ГГО. 1982. Вып.457. С.78-83.

6. Калов Х.М., Калов Р.Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозоградовые облака и туманы. – Нальчик: ООО «Полиграфсервис и Т», 2010. - 220 с.

7. Некоторые результаты по оценке физических параметров грозоградовых процессов на основе поляризационных измерений/Пашкевич М.Ю., Богомоллов О.С., Калов Х.М., Стрельцов Ю.П.//Труды Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы.- Л.: Гидрометеоздат, 1990.- С.537-542.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКА «МЕТЕОСАТ» ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТА ВОЗДЕЙСТВИЙ

А.А. Синькевич, А.Б. Куров

ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

Введение

Перспективным методом оценки эффекта воздействий может стать метод, основанный на измерениях характеристик облаков с искусственных спутников Земли. В этой связи использование наблюдений с помощью сканирующего радиометра SEVIRI (спутник «Метеосат») для получения характеристик облаков имеет важное практическое и научное значение [4]. За рубежом уже предприняты первые попытки использовать для этой цели результаты измерений в различных диапазонах спектра [10,12,14,15]. В России также сделаны первые шаги в этом направлении [1-3,6,8,9].

Европейская геостационарная метеорологическая спутниковая система Meteosat успешно используется с 1977 г. Геостационарные спутники располагаются в экваториальной полосе и обеспечивают непрерывный обзор от 70° ю.ш. до 70° с.ш. Измерения с помощью радиометра ведутся в 12 каналах.

Радиометр просматривает поверхность земли линия за линией; каждая линия состоит из ряда индивидуальных элементов изображения или пикселей. Для каждого пикселя радиометр измеряет энергию в различных спектральных диапазонах.

В последние два десятилетия в России большое внимание уделялось развитию методов воздействий на облака с целью предотвращения или уменьшения количества выпадающих осадков в крупных промышленных центрах. Важное значение имеют также работы по увеличению осадков при воздействиях на мощные кучевые облака.

Нами выполнены оценки эффективности работ по воздействиям на слоистообразные и конвективные облака кристаллизующим реагентом. При этом наряду с радиолокационной информацией использовались и результаты зондирования с ИСЗ «Метеосат». Рассмотрим полученные результаты.

Результаты использования спутниковых радиометрических измерений для контроля за воздействиями с целью предотвращения осадков в г. Петергофе

Для оценки физического эффекта воздействий проанализированы результаты эксперимента 15 мая 2004 г, когда проводились воздействия на облака в районе г. Петергофа с целью предотвращения выпадения осадков в городе.

В общем случае при наличии 10-балльной слоистообразной облачности поток радиации, принимаемый в ИК каналах радиометра SEVERI (10.8, 12 мкм), установленного на спутнике «Метеосат», может быть представлен следующим образом [12]:

$$F_{\bullet} = F_{bc} \tau_{ac} \tau_c + B_c \varepsilon_c \tau_{ac} + F_{ac} R_c \tau_{ac} + F_{hc} \quad , \quad (1)$$

где F_{\bullet} - поток радиации на верхней границе атмосферы; F_{bc} - восходящий поток на уровне основания облака; τ_{ac} - коэффициент пропускания слоя атмосферы, расположенного выше верхней границы облака; τ_c - коэффициент пропускания облака; B_c - функция Планка (при температуре облака); ε_c - излучательная способность облака; F_{ac} - поток нисходящей радиации на уровне земной поверхности; F_{hc} - поток восходящей радиации на уровне верхней границы атмосферы, формируемый слоем атмосферы, расположенным выше верхней границы облака.

В случае безоблачной атмосферы радиационный поток на верхней границе атмосферы может быть определен из следующего соотношения:

$$F_o = B_s \varepsilon_s \tau_{am} + F_d R_s \tau_{am} \quad , \quad (2)$$

где B_s - функция Планка (при температуре подстилающей поверхности); ε_s - излучательная способность подстилающей поверхности; τ_{atm} - коэффициент пропускания атмосферы; F_d - поток нисходящей радиации на уровне подстилающей поверхности, формируемый атмосферой; R_s - коэффициент отражения подстилающей поверхности. Полагая, что исследуемое слоистообразное облако и земная поверхность в рассматриваемом диапазоне длин волн по своим характеристикам близки к черным телам, представленные уравнения приводятся к следующему упрощенному виду:

$$F_o = B_c \varepsilon_c \tau_{ac} \quad (3)$$

$$F_o = B_s \varepsilon_s \tau_{atm} \quad (4)$$

Радиометр, установленный на спутнике, реализует следующий алгоритм [10]

$$T_b = \left[c_2 \nu / \log\left(\frac{c_1 \nu^3}{F} - b\right) \right] \frac{1}{a}, \quad (5)$$

где $C_1 = 2hc^2$ и $C_2 = (hc)/k$, в которых c , h , k скорость света и постоянные Планка и Больцмана соответственно; ν - волновое число, a и b - постоянные; T_b - радиационная температура.

Таким образом, в случае сплошной облачности, измеряемая радиационная температура спутником будет определяться температурой облака (точнее сказать слоем облака толщиной 100-200 м [5,7] вблизи его верхней границы), а в случае отсутствия облаков - температурой и излучательной способностью земной поверхности.

Конечно, это упрощенный подход, в реальных условиях наличие облаков верхнего яруса и потоки радиации, формируемые атмосферой, будут вносить свой вклад в измеряемую радиационную температуру, однако вклад земной поверхности в случае отсутствия облаков и слоистообразной облачности будет определяющим.

Воздействия в исследуемый день проводились на удалении 20-30 км от Петергофа с помощью твердой углекислоты. Они были начаты в 13 час 50 мин. Воздействия осуществлялись на курсах полета, перпендикулярных направлению ветра, протяженность линии воздействия - 15-20 км. Температура на верхней границе облаков -5-6°C. В облаках наблюдалось обледенение, облака были оптически плотными. Воздействия привели к выпадению осадков и последующему разрушению облаков, появлению просветов, через которые наблюдалась земная поверхность.

Эффект воздействия оценивался, исходя из следующих допущений: воздействия вызывают образование и выпадение осадков, что приводит к уменьшению оптической плотности облаков, в идеале возможно их полное рассеяние. Процесс этот происходит не мгновенно, а обычно занимает 20-40 минут. Соответственно, после воздействий оптическая плотность облаков по мере их рассеяния и движения по направлению к Петергофу, должна уменьшаться. Следовательно, радиационная температура пикселей должна повышаться. Можно ожидать, что разность радиационных температур между соответствующими пикселями и пикселями, расположенными на линии воздействий, должна возрасти при удачных воздействиях. Это повышение связано с тем, что в случае рассеяния облаков, больший вклад в радиационную температуру начинает вносить излучение подстилающей поверхности (температура воздуха на уровне подстилающей поверхности была $+5^{\circ}\text{C}$), температура которой существенно выше температуры верхней части облаков (температура верхней границы облаков составляла $-5-6^{\circ}\text{C}$).

Для оценки успешности воздействий в качестве критерия была выбрана следующая характеристика – ΔT_2 , представляющая собой разность радиационных температур пикселя, соответствующего Петергофу, и осредненной температуры пикселей, соответствующих линии воздействий. Полученная кривая приведена ниже (рис.1).

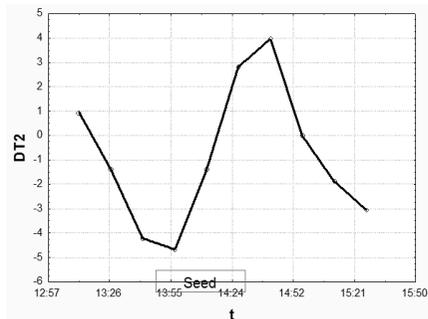


Рис.1. Изменение ΔT_2 со временем (seed – промежуток времени, когда проводились воздействия).

Радиационная температура пикселя, соответствующего Петергофу, была примерно равна или ниже соответствующей средней радиационной температуры на линии воздействий до проведения воздействий и в начальный период воздействий. В дальнейшем наблюдается постепенное повышение этой разности до $+4^{\circ}\text{C}$ к 14 час 42 мин, что неплохо соответствует времени

подхода зоны рассеяния облаков к Петергофу. Затем отмечается постепенное уменьшение этой разности.

Таким образом, воздействия привели к разрушению облаков, что сказалось на их оптических характеристиках и обеспечило возможность фиксации эффекта воздействия с помощью радиометра, установленного на спутник «Метеосат».

Результаты использования спутниковых радиометрических измерений для контроля за воздействиями на конвективные облака

Спутниковое зондирование обеспечивают получение информации о характеристиках облака и его верхней части (наковальни), позволяя исследовать ее динамические и микрофизические характеристики.

В данном разделе рассмотрен случай 4 июля 2008 г., когда измерения проводились в юго-западной части Саудовской Аравии. Исследуемое облако развивалось над горной грядой, вытянутой вдоль побережья Красного моря вблизи города Абха.

На юго-востоке от исследуемого кучево-дождевого облака (Cb2, рис.2) располагалось мощное кучевое облако (фидерное облако), отражаемость которого была невелика и радиоэхо от него отсутствовало. На 85 минуте от начала наблюдений начались самолетные воздействия на это облако. Пилоты отметили высокую влажность в нем, восходящий поток достигал 7 м/с. Через 10 минут после начала воздействий появилось радиоэхо. Облако стало быстро развиваться. Оно слилось с Cb2 на 115 минуте.

Здесь мы приводим трехмерные изображения формирования наковальни исследуемого кучево-дождевого облака в период 90-120 минут (Рис 2). Они были построены по результатам зондирования спутником «Метеосат» 9 в окне прозрачности с центром 10.8 мкм. Из представленных изображений хорошо видно расположение наковален Cb1 и Cb2. Первое кучево-дождевое облако (Cb1) в своем вертикальном развитии достигло задерживающего слоя вблизи изотермы -83°C и сформировало обширную наковальню, имеющую приблизительно круговую форму над облаком, а также часть, вытянутую в направлении ведущего потока. После воздействия происходит заметный вертикальный рост новой фидерной ячейки, ее высота достигает 16 км, в ее верхней части начинает активно формироваться наковальня (Рис.2, Cb3). На 120 минуте произошло слияние "материнского облака Cb2" и фидерного облака (Cb3), вершина облака четко видна на представленном трехмерном изображении, облако достигло максимума в своем вертикальном развитии, и продолжалось формирование наковальни.

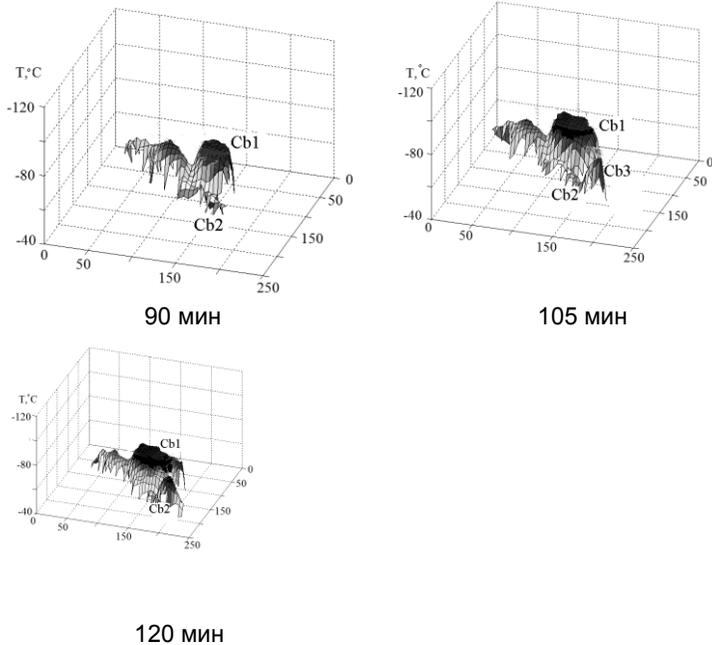


Рис.2. Трехмерное изображение облаков, полученное из результатов зондирования в окне прозрачности с центром 10.8 мкм (цифры на горизонтальной плоскости – км), Cb3 – новая ячейка, которая появилась после воздействия, она далее слилась с Cb2.

Анализ результатов измерений для рассматриваемого случая показал, что процесс слияния кучево-дождевого облака с фидерными облаками оказывает существенное влияние на его характеристики. Во всех рассмотренных случаях слияния высота верхней границы облака возрастает, при этом возрастание существенно различно для рассмотренных случаев, составляя от 20 до 200%.

Анализ данных дистанционных измерений позволил оценить возможное изменение осадков. Получено, что поток осадков также существенно возрастает после слияния кучево-дождевого облака с фидерными облаками. Это возрастание достигает 200-800%. Важно отметить и увеличение интенсивности осадков во всех случаях слияния фидерных облаков с кучево-дождевым. Это увеличение равно 300-900%.

В проанализированном в статье эксперименте выполнялись воздействия на фидерные облака. Полученные данные позволяют утверждать, что воздействия стимулировали развитие фидерных облаков, что интенсифици-

ровало процесс их слияния с кучево-дождевым облаком и далее сказывалось на его осадкообразовании, хотя, естественно, здесь требуется продолжение исследований.

Выводы

Анализ данных зондирования с ИСЗ позволяет существенно расширить информацию о характеристиках облаков, подвергнутых воздействиям.

В работах по рассеянию слоистообразных облаков применение данных зондирования с ИСЗ «Метеосат» обеспечивает возможность контроля за динамическими характеристиками зоны кристаллизации.

При исследовании кучево-дождевых облаков использование информации в различных диапазонах спектра обеспечивает возможность получения динамических характеристик облака, а также ряда микрофизических характеристик, включая информацию об осадках.

Настоящая работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 13-05-92697 ИНД_а.

Список литературы

1. Краус Т.В., Синькевич А.А., Гхулам А.С. Измерение осадков высокой интенсивности дистанционными методами//Метеорология и гидрология. 2012. № 7. С.15-27.

2. Краус Т.В., Синькевич А. А., Бургер Р., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д. Исследование влияния динамических факторов на развития кучево-дождевого облака в Саудовской Аравии//Метеорология и гидрология. 2011. № 10. С.5-19.

3. Краус Т. В., Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Макитов В. С., Степаненко В. Д. Комплексное исследование характеристик кучево-дождевого облака, развивавшегося над Аравийским полуостровом в условиях большого дефицита точки росы в атмосфере. Часть 2. Анализ данных спутника “Meteosat”//Метеорология и гидрология. 2011. № 3. С.36-47.

4. Медведев Г.А. Определение кучево-дождевых и грозовых облаков на снимках метеорологического спутника «Метеосат»//Метеорология и гидрология. 1994. № 5. С.21-28.

5. Руднева Л.Б., Синькевич А.А. Оценка геометрической толщины слоя, формирующего излучение черного тела в облаках различных форм//Тр. ГГО. 1981. Вып.448. С.76-85.

6. Синькевич А. А., Н. Е. Веремей, Н. Н. Волков, Ю. А. Довгалюк, В. Д. Степаненко, Г. Г. Щукин. Результаты комплексного использования спутниковых радиометрических, наземных радиолокационных измерений и данных численного моделирования облаков для контроля за воздействиями

с целью предотвращения осадков в г. Петергоф//Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С.23-33.

7. Синькевич А.А. Конвективные облака северо-запада России. - Л.: Гидрометиздат, 2001. - 106 с.

8. Синькевич А.А., Т.В. Краус, А.С. Гхулам, А.Б. Куров. Исследование характеристик кучево-дождевых облаков большой мощности после воздействий с целью увеличения осадков//Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С.5-20.

9. Krauss T.W, Sinkevich A.A., Veremey N.E., Dovgaluk Y.A., Stepanenko V.D. Investigation of Large Vertical Depth Cb in India//Proceedings 4th European Conference on Severe Storms, Trieste – ITALY, 2007.

10. Krauss Terrence W., Andre A. Sinkevich and Ayman S. Ghulam. Effects of Feeder Cloud Merging on Storm Development in Saudi Arabia. JKAU//Met., Env. & Arid Land Agric. Sci. Vol. 22. No. 2. P.23-39 (2011 A.D./1432 A.H.) DOI: 10.4197/Met. 22-2.2.

11. Radiances to brightness temperature conversion. Eumetsat, EUM/OPS/TEN/05/2556. 2005. V. 2.

12. Rosenfeld D., Xing Yu, Jin Dai. Satellite-Retrieved Microstructure of AgI Seeding Tracks in Supercooled Layer Clouds//Journal of Applied Meteorology. 2006. V. 44. P.760-767.

13. Sinkevich A.A., T.W. Krauss. Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging// 2014. V.142. P.124–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres>.

14. Study on Cloud Properties derived from Meteosat Second Generation Observations EUMETSAT ITT no. 97/181 Final Report Rutherford Appleton Laboratory Council for the Central Laboratory of the Research Councils, 1998.

15. Woodley W., Rosenfeld D., Strautins A. Identification of a seeding Signature in Texas Using Multi-Spectral Satellite Imagery//Journal of Weather Modification. 2000. V.32. P.37-52.