

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 КОНФЕРЕНЦИИ**  
**ПО ФИЗИКЕ ОБЛАКОВ И АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ**  
**НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

23-27 октября 2017г.

Часть 1

г. Нальчик

УДК 551.509 + 551.324 + 504.3.054  
ББК Д241.4я43 + 26.823 + 20.1  
Д 633

***Оргкомитет конференции:***

Председатель: Беккиев М.Ю. – директор ФГБУ «ВГИ»

Заместители председателя: Калов Р.Х. – зам. директора ФГБУ «ВГИ» по научной работе;  
Федченко Л.М. – главный научный сотрудник ФГБУ «ВГИ»;  
Абшаев М.Т. – главный научный сотрудник ФГБУ «ВГИ»;  
Калов Х.М. – главный научный сотрудник ФГБУ «ВГИ»

***Члены оргкомитета:***

Барекова М.В. – ученый секретарь ФГБУ «ВГИ»;

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

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

Лиев К.Б. – зав. лабораторией радиолокационной метеорологии ФГБУ «ВГИ»;

Ташева Л.А. – комендант.

**Д 633**

**Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы:** сборник научных трудов. В 2 ч. Ч. 1 / Коллектив авторов. - Уфа: АЭТЕРНА, 2017. - 354 с.

ISBN 978-5-00109-256-8 ч.1

ISBN 978-5-00109-258-2

Сборник содержит доклады, представленные на Всероссийскую конференцию по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (23-27 октября 2017 г.), затрагивающие различные аспекты научных исследований в данной области, включая численное моделирование, натурные и лабораторные исследования, разработку и совершенствование техники и технологии АВ и др.

В конференции приняли участие специалисты в области модификации погоды из Москвы, Санкт-Петербурга, Долгопрудного, Нальчика.

На конференцию представлен 91 доклад по следующим секциям:

- Секция 1. «Исследование процессов облако- и осадкообразования» (59 докладов, в том числе 26 стендовых);
- Секция 2. «Методы и технические средства активных воздействий на гидрометеорологические процессы» (24 доклада, в том числе 13 стендовых)
- Секция 3. «Оценка эффективности работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы» (3 доклада)
- Секция 4. «Экологические аспекты активных воздействий» (5 докладов)

## Содержание

<b>Абшаев М.Т., Малкарова А.М., Тасенко С.В., Шумаков И.А.</b> Этапы развития противогорадовых работ	7
---	---

### СЕКЦИЯ 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЛАКО- И ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ

#### 1.1. Численное моделирование облачных процессов

<b>Пастушков Р.С.</b> Оперативная численная модель оценки результатов активных воздействий гигроскопическими и льдообразующими веществами на внутримассовую конвективную облачность. Концепция и постановка задачи	28
<b>Белова Л.К., Дрофа А.С.</b> Анализ процессов осадкообразования в конвективных облаках по результатам численного моделирования	36
<b>Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Гучаева З.Х., Увижева Ф.Х., Шаповалов В.А.</b> Исследование взаимодействия облака с окружающей атмосферой на основе численного моделирования	44
<b>Кулиев Д.Д., Шаповалов А.В.</b> Математическое моделирование процессов образования электрического заряда в конвективных облаках	52
<b>Довгалоук Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А., Торопова М.Л., Куров А.Б., Волков Н.Н.</b> Влияние аэрозолей, образующихся при лесных пожарах, на эволюцию конвективных облаков и связанных с ними осадков (численное моделирование)	58
<b>Колосков Б.П., Частухин А.В., Бычков А.А., Петрунин А.М., Корнеев В.П., Василенко С.В., Ильин В.М.</b> Применение наземных аэрозольных жидкостных генераторов в работах по искусственному увеличению осадков и противогорадовой защите	66
<b>Владимиров С.А., Пастушков Р.С.</b> Численное моделирование влияния аэрозольного состояния атмосферы и термических характеристик подстилающей поверхности на эффективность активных воздействий на осадкообразующие конвективные облака	74
<b>Гаева З.С., Гасников А.В.</b> Распараллеливание уравнения Смолуховского	81
<b>Шаповалов А.В., Шериева М.А., Ковалев Е.А., Шереметьев Р.В.</b> Численное решение уравнений коагуляции для конвективного облака смешанного типа с использованием дискретного представления спектров частиц	87

<b>Частухин А.В., Сергеев Б.Н., Колосков Б.П., Бычков А.А.</b> Численное моделирование активных воздействий на низкую слоистообразную облачность и туманы	95
<b>Шаповалов А.В., Рязанов В.И., Гучаева З.Х., Увижева Ф.Х., Шаповалов В.А.</b> Численное моделирование распространения примесей с учетом метеопараметров и данных ДМРЛ	101
<b>Керимов А.М., Шаповалов А.В.</b> Численное моделирование распространения атмосферных примесей в горностепной зоне	108
<b>Набродова Е.Г., Диденко А.Ю., Закинян Р.Г.</b> Распространение волн в атмосфере с ненулевой дивергенцией	114
<b>Семенова Ю.А., Закинян А.Р., Закинян Р.Г.</b> Описание вихревого состояния сухой атмосферы при наличии дивергенции скорости	122
<i>1.2. Лабораторное моделирование и натурные исследования облачных процессов</i>	
<b>Бычков А.А., Сергеев Б.Н., Щукин Г.Г.</b> Оценка эффективности искусственного увеличения осадков с использованием лёгких летательных аппаратов	130
<b>Синькевич А.А., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Михайловский Ю.П., Попов В.Б.</b> Слияние конвективных облаков	141
<b>Хучунаев Б.М., Хатефова С.Б., Хучунаев А.Б.</b> Натурные и лабораторные исследования механизма образования града	147
<b>Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П., Михайловский В.Ю.</b> Параметризация механизмов электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках	154
<b>Шилин А.Г., Иванов В.Н., Савченко А.В., Андреев Ю.В.</b> Исследование динамики изменения льдообразующей активности аэрозолей различной природы при длительном нахождении в окружающей среде	162
<b>Хучунаев Б.М., Теунова Н.В., Будаев А.Х., Хучунаев А.Б.</b> Результаты исследования влияния добавок из нанотрубок углерода на льдообразующие свойства пиротехнического состава АД1	168
<b>Данелян Б.Г., Сосникова Е.В.</b> Современное состояние разработок реагентов для работ по активным воздействиям	174
<b>Частухин А.В., Ким Н.С., Корнеев В.П., Петрунин А.М., Баззаев Т.В., Данелян Б.Г., Сосникова Е.В.</b> Исследование льдообразующей эффективности полноразмерных жидкостных и пиротехнических наземных аэрозольных генераторов на аэродинамическом стенде ФГБУ «ЦАО»	181
<b>Калов Х.М., Калов Р.Х.</b> Динамика и турбулентность в облачной атмосфере	188

<b>Струнин А.М., Струнин М. А.</b> Определение стадии роста конвективного облака по данным самолетных наблюдений для проведения работ по активным воздействиям	197
<b>Торгунаков Р.Е., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А.</b> Совершенствование самолетной методики измерения напряженности электрического поля и заряда самолета для решения задач комплексных исследований облаков	205
<b>Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Циканов Х.А.</b> Радиолокационные характеристики облаков в стадии выпадения града	213
<b>Коровин Е.А., Кононов И.И., Щукин Г.Г., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В.</b> Однопозиционная система мониторинга грозовой активности на основе совместного использования Е-Н дальномера и датчика напряженности электрического поля Земли	219
<b>Калинников В.В., Удриш В.В., Тертышников А.В.</b> Возможности использования станции приема сигналов ГНСС ФГБУ «ВГИ» в Нальчике для мониторинга интегрального содержания водяного пара в атмосфере	225
<b>Данелян Б.Г., Ковалев Н.А., Сажин И.В., Сементин В.Л., Столпиченко О.А.</b> Тушение лесных пожаров с помощью искусственного вызывания осадков. Состояние вопроса и предварительные результаты	229
<b>Аппаева Ж.Ю., Березинский И.Н., Инюхин В.С., Чередник Е.А.</b> Некоторые особенности развития одноячейковых градовых облаков на Северном Кавказе	237
<b>Дрофа А.С., Иванов В.Н., Данелян Б.Г., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Бычков А.А., Частухин А.В.</b> Натурный эксперимент по воздействию на облака солевым порошком	245
<b>Куров А.Б., Веремей Н.Е., Синькевич А.А., Волков Н.Н.</b> Результаты лабораторных исследований влияния продуктов горения, образующихся при лесных пожарах, на процессы кристаллизации капель воды	252
<b>Хучунаев Б.М., Ташилова А.А., Теунова Н.В., Хучунаев А.Б.</b> Льдообразующие свойства оксида цинка	256
<b>Инюхин В.С., Березинский И.Н., Чередник Е.А.</b> Физико-статистическая модель отдельной градовой ячейки	261
<b>Постельная А.Е., Абшаев А.М.</b> Заморозки и их исследование с помощью СВЧ-радиометра	275
<b>Калов Х.М., Калов Р.Х.</b> Создание просветления в облачной среде	284

### *1.3. Аппаратура и методы измерения*

**Стасенко В.Н.**

О разработке систем мониторинга и оценки последствий опасных явлений в мезомасштабных конвективных комплексах 288

**Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Чочаев Х.Х.**

Роботизированная система противорадовой защиты «АСУ-Град» 291

**Бейтуганов М.Н., Чочаев Х.Х.**

Методика обеспечения противорадовой защиты городов и сельскохозяйственных культур, находящихся в секторах, где пуски противорадовых ракет запрещены 306

**Инюхин В.С., Куцев С.А., Лиев К.Б., Макитов В.С.**

Радиолокационные исследования распределения районов формирования первого радиоядра градовых облаков 311

**Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Кашлева Л. В.**

О контроле электрического генератора конвективных облаков для прогноза и диагноза опасных явлений погоды 320

**Пивкин А.Н., Бейтуганов М.Н., Чочаев Х.Х., Машуков Х.Х.**

Использование бескорпусных ракетных двигателей для воздействия на атмосферные процессы 328

**Жарашуев М.В., Гергоков А.Х., Макитов В.С., Кулиев Д. Д.**

Методика уменьшения погрешности при сопоставлении наземных и радиолокационных данных 336

**Жарашуев М.В., Макитов В.С., Кулиев Д.Д., Гергоков А.Х.**

Метод автокалибровки радиолокационной сети 344

## ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАБОТ

Абшаев М.Т.<sup>1</sup>, Малкарова А.М.<sup>2</sup>, Тасенко С.В.<sup>2</sup>, Шумаков И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик

<sup>2</sup>Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
(Росгидромет), г. Москва

### 1. Этапы развития и становления противоградовых работ

В 1956 г. руководителем Главного управления гидрометеорологической службы (ГУГМС) при Совете Министров СССР академиком Е.К. Федоровым была поставлена проблема разработки методов борьбы с градом [16] и были начаты исследования градовых процессов в Эльбрусской экспедиции (г. Нальчик), в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО, г. Долгопрудный), Главной геофизической обсерватории (ГГО, г. Ленинград), Среднеазиатском гидрометеорологическом институте (САНИГМИ г. Ташкент), Закавказском гидрометеорологическом институте (ЗАКНИГМИ, г. Тбилиси). Эти работы параллельно велись и в Институте геофизики АН Грузинской ССР (г. Тбилиси).

В период с 1956 по 1962 г. на основе этих исследований были разработаны первые представления о механизме образования града, и заложены основы артиллерийского и ракетного методов воздействия на градовые процессы [10,11,15].

**Артиллерийский метод** был разработан в ВГИ под руководством профессора Г.К. Сулаквелидзе и предусматривал засев кристаллизующими частицами областей зарождения и роста града с целью увеличения в них концентрации зародышей града примерно в 1000 раз, полагая, что их конкуренция за облачную воду приведет к образованию мелкого града, который растает, не достигая поверхности земли [16].

**Ракетный метод** борьбы с градом был создан под руководством И.И. Гайворонского, Ю.А. Серегина и А.И. Карцивадзе на основе обширных исследований градовых процессов, проведенных ЦАО в Молдавии и ИГАН Грузинской ССР в Алазанской долине [11]. Этот метод также базировался на концепции конкуренции и предусматривал засев передней части области повышенного радиоэха.

В ЗАКНИГМИ (г. Тбилиси) был разработан **комбинированный** артиллерийский метод предотвращения града (Бартишвили Я.Т., Гудушаури Ш.Л., Ломинадзе В.П.), предусматривавший ухудшение условий роста града путем засева теплой части облака гигроскопическими частицами, а переохлажденной части кристаллизующими частицами с использованием артиллерийских снарядов «Эльбрус-4» с AgI и NaCl [11].

В 1962 – 1963 гг. были проведены авторские испытания артиллерийского и ракетного методов в Кабардино-Балкарии, Молдавии и Грузии.

В 1963 – 1966 гг. была проведена опытная защита от градобитий на Северном Кавказе, в Молдавии, Армении и Грузии на площади около 900 тысяч га. Государственная комиссия положительно оценила результаты испытаний и рекомендовала методы борьбы с градом для широкого применения.

Постановлением Совета Министров СССР от 22 апреля 1967 года № 355 в системе ГУГМС при Совете Министров СССР были созданы Комплексные противогородовые экспедиции при ВГИ, ЗАКНИГМИ, САНИГМИ, а также при УГМС Армянской, Азербайджанской, Молдавской и Таджикской ССР, на которые было возложено проведение производственных работ по защите сельскохозяйственных культур от градобитий. На базе Кавказской противогородовой экспедиции ВГИ были созданы Северо-Кавказская, Краснодарская, Армянская, Грузинская, Азербайджанская, Таджикская и Узбекская территориальные противогородовые экспедиции, работавшие с применением артиллерийского метода.

На базе Молдавской экспериментальной базы ЦАО была создана Молдавская противогородовая экспедиция ЦАО, а в 1970 г. – Крымская, работавшие с применением ракетного метода.

В 1976 г. приказом ГУГМС при СМ СССР от 03.06.1976 № 114 «О реорганизации противогородовых подразделений Гидрометслужбы» эти противогородовые экспедиции были преобразованы в Военизированные службы по борьбе с градом (ВСБГ) – Северо-Кавказскую, Краснодарскую, Азербайджанскую, Армянскую, Таджикскую, Молдавскую, Крымскую и отдельные военизированные части УГМС Украинской, Грузинской и Узбекской ССР.

Этот этап развития противогородовых работ завершился созданием трех вариантов (артиллерийского, ракетного и комбинированного) методов противогородовой защиты (ПГЗ) и формированием территориальных военизированных подразделений по борьбе с градом. Артиллерийский метод ВГИ применялся на Северном Кавказе, Закавказье и Средней Азии на площади около 6000 тысяч га, ракетный метод ЦАО и ИГ АН Грузинской ССР – в Молдавии и Грузии на площади 3300 тысяч га; метод ЗАКНИГМИ – в Грузии на площади 600 тысяч га.

**Второй этап** развития противогородовых работ характеризуется *унификацией* трех вариантов метода ПГЗ в единую технологию, формированием, единой государственной системы защиты от градобитий и расширением площадей защиты.



На этом этапе большой вклад в развитие противоградовых работ внес Научно-производственный центр противоградовой защиты (НПЦ ПГЗ) ВГИ, созданный в 1980 г. приказом Госкомгидромета СССР № 187 от 10.06.1980 г. На него было возложено дальнейшее развитие технологии и технических средств ПГЗ и научно-методическое руководство всеми ВСБГ. В рамках этой деятельности НПЦ ПГЗ под руководством М.Т. Абшаева в период с 1980 по 1986 год была создана унифицированная технология ПГЗ, в основу которой положены:

- новая концепция предотвращения града [1], предусматривающая ускорение осадкообразования в областях нового роста (областях будущего градообразования);
- единые одноволновые и двухволновые методы обнаружения града [2];
- единые радиолокационные средства – радиолокатор «МРЛ-5», аппаратура многоконтурного изоэха «БОМО» [7];
- новые схемы засева градовых облаков различной структуры, основанные на классификации градовых процессов по особенностям их пространственной строения и динамики развития, а также классификации объектов воздействия (ОВ) на 4 категории в зависимости от степени градоопасности [1,17];
- единые методики оценки физической и экономической эффективности ПГЗ [6];
- единые руководящие документы, регламентирующие организацию и проведение противоградовых операций;
- централизованная подготовка и аттестация специалистов по воздействию, радиолокации, ракетной и артиллерийской технике и прогнозам на ежегодных курсах;
- ежегодная инспекция всех ВСБГ с оценкой качества выполнения технологии, выявлением методических, технических и организационных проблем;
- регулярный анализ, систематизация и обобщение опыта ПГЗ;
- ежегодные совещания по обсуждению результатов работ во всех регионах.

НПЦ ПГЗ по договорам с предприятиями Минрадиопрома, Минмаша и Минхимпрома СССР на базе централизованного финансирования были созданы и внедрены в промышленное производство и практическое применение радиолокатор «МРЛ-5», усовершенствованы ракетные комплексы «Облако» и «Алазань-2М», созданы ракетные комплексы с дистанционным управлением «Небо» и «Кристалл» с повышенным радиусом действия.

В 1982 г. все ВСБГ и ОВЧ Приказом Государственного комитета по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Госкомгидромета) № 261 от 23.11.1981 г. были переименованы в Военизированные службы по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы. В период 1982-1990 гг. функционировали 10 ВС и ОВЧ Госкомгидромета СССР, которые из года в год расширяли площади защиты.

До 1990 г. в системе Госкомгидромета СССР была создана и функционировала стройная система ПГЗ, которая включала 10 территориальных ВС и ОВЧ, имевших в своем составе 96 противорадиолокационных отрядов и 844 артиллерийских и ракетных пункта (рис. 1), которые в наиболее радиолокационных районах страны осуществляли защиту на площади 10491 га [1].

Из-за политических и экономических перемен в 1989 г. была приостановлена защита в Грузии, в 1990 г. – в Азербайджане, в 1991 г. в Армении и в 1992 – в Таджикистане, сокращены площади защиты в России и Молдавии. С 1990 г. прекращено применение артиллерийского комплекса. В 1996 г. не было защиты в ряде субъектов Северного Кавказа и Молдавии. Но в 1997 г. восстановлена защита в России и Молдавии, в 2006 г. – в Армении (но, с применением акустических генераторов) в 2007 г. – в Таджикистане и с 2014 г. защита восстанавливается в Грузии.

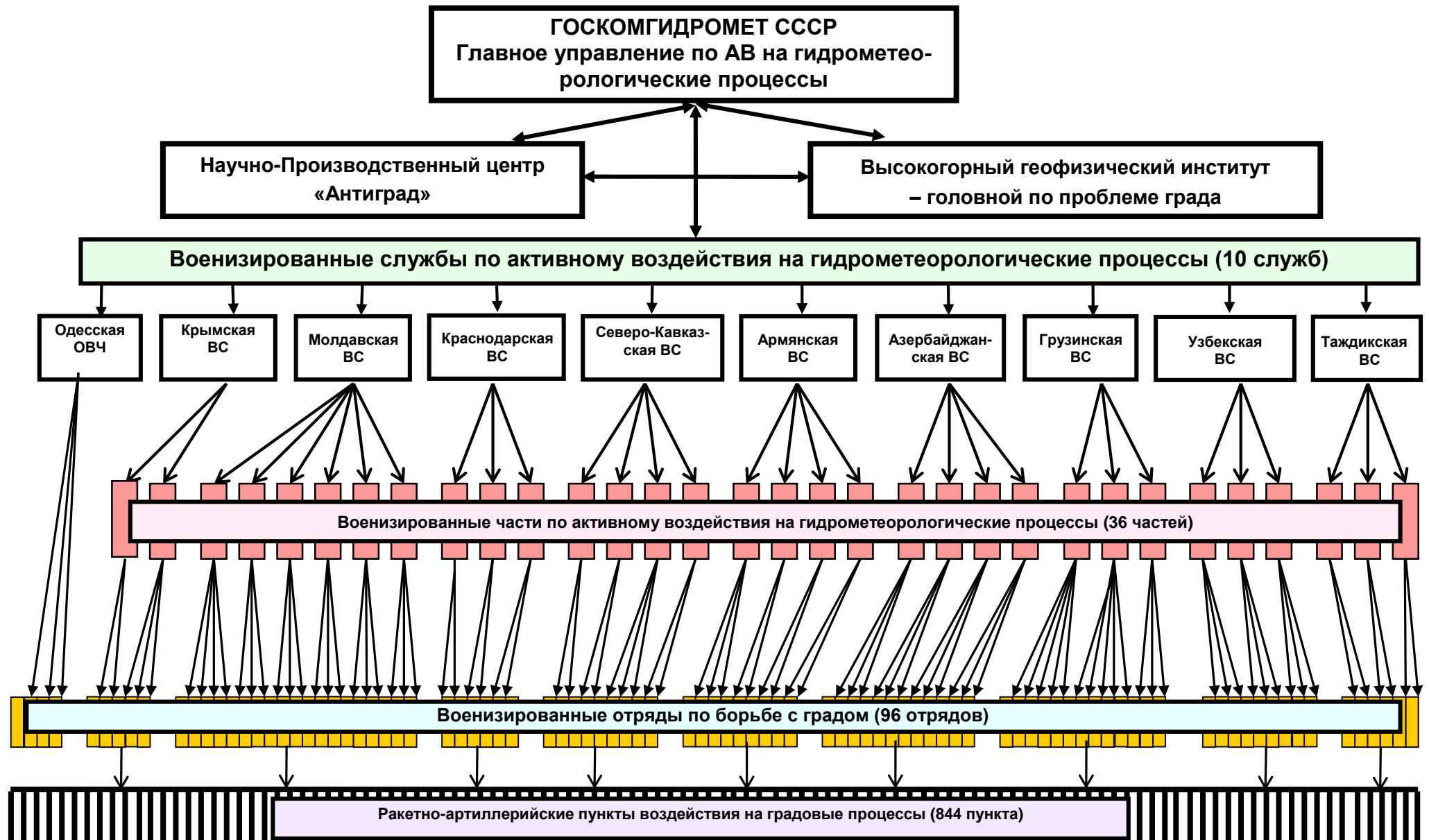


Рис. 1. Организационная структура системы противорадовой защиты в СССР [6].

## 2. Создание технических средств засева градовых облаков

2.1. Для реализации артиллерийского метода борьбы с градом в НИИ Машиностроения (г. Москва) под руководством Г.К Сулаквелидзе [15] в 1961-1968 гг. были созданы артиллерийские противоградовые комплексы в составе зенитных пушек «КС-19», «КС-30», противоградовых снарядов «Эльбрус-2», «Эльбрус-4» калибра 100 мм и «Эльбус-3» калибра 130 мм, начиненных AgI (Я.С. Чупров, Р.Н. Станков), и дистанционных взрывателей «ДВЭ-1», «ДВЭ-2» и «ДВЭ-3» (Г.А. Окунь). Комплекс «Эльбрус-4», имел радиус действия 13-14 км и применялся с 1964 до 1990 г. на Северном Кавказе, в Закавказье и Средней Азии для защиты площади до 7 млн. га (рис.1). Комплекс «Эльбус-3» с радиусом действия 18 км применялся только в Кабардино-Балкарии до 1972 г. Серийное производство артиллерийских снарядов осуществлял Невьянский механический завод (В.В. Хохонов).



Рис. 2. Артиллерийский комплекс «Эльбрус-4».

2.2. Для реализации ракетного метода борьбы с градом Московским Институтом Теплотехники (Н.Г. Карягин) и Тульским НИИ «Точмаш» (А.Н. Ганичев, В.И. Дмитриев) под научным руководством И.И. Гайворонского и Ю.А. Серегина были созданы противоградовые ракеты первого поколения «ПГИ-М» и «Облако», а под научным руководством А.И. Карцивадзе [11] в НИИПХ (г. Сергиев Посад) – ракета «Алазань-1» (Годораж А.И. и др.) (рис.3). Эти ракеты были снаряжены льдообразующими составами с  $PbI_2$ , а позже с AgI. Ракетные установки «ТКБ-01», «ТКБ-04», и «ТКБ-040» для пуска ракет «ПГИ-М», «Облако» и «Алазань-1», соответственно были разработаны Тульским КБ спортивного оружия «Скиф».

Ракетные комплексы «ПГИ-М» (радиус действия 3 км) и «Облако» (радиус действия 8 км) применялись в Молдавии, Крыму и Средней Азии, обеспечивая защиту на площади около 3.6 млн га до 1990 г. В 1967 г. в НИИПХ были созданы (Н.А. Силин, П.А. Несмеянов)

двухступенчатая ракета «Алазань-2» (радиус действия 8 км), и одноступенчатая ракета «Алазань-2М-1Ст» (радиус действия 6 км), которые применялись в Грузии. В 1972 г. эти ракеты были модернизированы и приняты на вооружение противорадовых служб ГУГМС при СМ СССР.



Рис. 3. Ракетные противорадовые комплексы первого поколения.

2.3. С 1981 по 1986 г. в целях повышения эффективности и радиуса засева градовых облаков под научным руководством М.Т. Абшаева были созданы ракетные комплексы второго поколения «Небо» и «Кристалл», имевшие системы дистанционного телемеханического управления и пуска ракет [4] (рис.4).

Комплекс «Небо» состоял из ракеты «Небо» и 18 ствольной пусковой установки (ПУ) «МС-280Н». Ракета «Небо» была разработана в НИИ Точмаш НПО «Сплав» (А.Н. Ганичев, В.Х. Азиев) на базе пастообразного топлива, созданного в ГИПХ, и обеспечивала засев облаков в радиусе 13 км. ПУ «МС-280Н» разработана в Свердловском КБ завода им. Калинина (О.Н Кривошапка) и обеспечивала возможность пуска 12 ракет в минуту с перенаведением по азимуту после каждого пуска [4].

В состав комплекса «Кристалл» входила пусковая установка «ТКБ-0183», ракеты «Кристалл-1» (для работы в горных условиях) и «Кристалл-2» (для работы в равнинных условиях). Эти ракеты разработаны в НИИПХ (Н.М. Вареных, П.А. Несмеянов, В.Д.Серов), имеют головные части с модульным снаряжением, обеспечивающим объемный засев облаков за счет отстрела по траектории полета пиротехнических модулей, возгоняющих льдообразующий состав с AgI на пути 0,5 км. ПУ «ТКБ-0183» была разработана в СКБ «Скиф» (А.А. Васильев, В.В. Бехтяков), и также обеспечивала пуск до 12 ракет в минуту с перенаведением по азимуту [4].

Применение комплексов «Небо» и «Кристалл» в регионах ПГЗ показало их высокую эффективность, однако из-за высокой стоимости ракет и ПУ их применение было прекращено.



Рис. 4. Ракетные противорадиолокационные комплексы второго поколения.

2.4. В период 1986-1989 гг. производилось до 240 тысяч противорадиолокационных снарядов и ракет разных модификаций, в том числе около 40 – 50 тысяч ракет на экспорт в Болгарию, Венгрию, Аргентину и Бразилию. Основным производителем противорадиолокационных ракет является Чебоксарское производственное объединение (ЧПО) им. В.И. Чапаева (Г.И. Хорошев, В.И. Пейве, М.С. Резников, В.Е. Лившиц), которое выпустило более 2,3 млн. ракет семейств «Алазань» и «Кристалл». Производство этих ракет осуществлялось в кооперации с рядом предприятий Министерства Машиностроения СССР, поставлявших ряд комплектующих.

Кризисные 1990 годы, в связи с разрушением этой кооперации и прекращением производства ПГИ и их комплектующих другими заводами, вынудили создать ракеты «Алазань-3» (1992 г.), «Алазань-ЧМ15» (1994 г.), «Алазань-5» (1996 г.), «Алазань-6» (2000 г.), почти все комплектующие которых изготавливались в ЧПО им. Чапаева [12]. Эти ракеты были разработаны НИИПХ и ЧПО им. Чапаева (П.А. Несмеянов, И.Н. Шакиров, В.С. Поносов) под научным руководством НПЦ ПГЗ (М.Т. Абшаев, Б.К. Кузнецов, Б.Н. Дубинин). Для их пуска использовалась и используется 12 ствольная ракетная установка «ТКБ-040», производство и модернизация которой осуществлялась на Кишиневском электромеханическом заводе.

2.5. В период с 2002 по 2015 г. были созданы ракетные комплексы третьего поколения (рис.5). В основу их создания положены следующие требования:

- повышение льдообразующей эффективности противораковых ракет;
- повышение точности и дальности доставки реагентов в облака;
- снижение габаритно-массовых характеристик и себестоимости ракет и ПУ;
- автоматизация противораковых операций с целью повышения оперативности АВ и исключения источников субъективных ошибок;
- снижение себестоимости ПГЗ счет сокращения расхода ракет, числа ракетных пунктов и численности персонала;
- повышение безопасности и экологической чистоты противораковых ракет.

В соответствии с этими требованиями НПЦ «Антиград» были сформулированы технические задания (М.Т. Абшаев), созданы кооперации заинтересованных НИИ, КБ и выполнены НИОКР по созданию противораковых комплексов нового поколения за счет самофинансирования.

Кооперацией ОАО НПО «Искра», НИИ ПМ, ОАО «Мотовилихинские заводы» был создан (М.И. Соколовский, Г.А. Зыков, Е.И. Иоффе, А.П. Шварев) автоматизированный ракетный комплекс «Алан-2», обеспечивающий высокий темп засева градовых облаков [8], однако ракета «Алан-2» и автоматизированная пусковая установка (ПУ) «Алан-МЗ» оказались дорогими для массового применения.

ООО НПЦ «Антиград» по финансированию ЧПО им. Чапаева и Агентства «АНО АТ-ТЕХ» разработана ПУ «Элия» (М.Т. Абшаев, Б.К. Кузнецов), имеющая ручное и полуавтоматическое управление и сменные пакеты направляющих для запуска всех типов ракет с реактивным и минометным стартом: «Алазань-6», «Алан-2» и «Ас» [8].

ОАО «Телемеханика» (А.М. Каиров) за собственный счет разработана и освоена в серийное производство модернизированная ПУ «Элия-МР» с ручным управлением на замену физически изношенных ПУ «ТКБ-040».



Рис. 5. Ракетные противорадиолокационные комплексы третьего поколения.

Кооперацией ВНИИП «Дарг» (П.А. Несмеянов) и ЧПО им. Чапаева (А.Ш. Мингазов, В.С. Поносов) при финансовой поддержке Агентства «АНО АТТЕХ» в 2011 создана малогабаритная противорадиолокационная ракета «Алазань-9» калибра 60 мм с жестким оперением [12,18]. Применение в «Алазань-9», также как и в «Алазань-6», ленточного заряда ВВ, размещенного вдоль корпуса, позволило при высокой надежности и меньшей стоимости получить повышенную безопасность изделия, по сравнению с системой самоликвидации с сосредоточенным зарядом ВВ в ракетах «Алазань-2М» и «Кристалл».

Кооперацией ООО НПЦ «Антиград» (М.Т. Абшаев, Б.Н. Кузнецов, А.М. Абшаев), НПЦ «ИРВИС» (Д.В. Кратиров, Н.И. Михеев) и АО «НИИПМ» (А.Е. Голубев, Э.М. Энкин, В.А. Зорин) за счет самофинансирования каждого участника в 2006-2014 гг. был разработан автоматизированный ракетный противорадиолокационный комплекс «Ас-Элия» в составе малогабаритной ракеты «Ас» калибра 57 мм и автоматизированной ПУ «Элия-2» с беспроводным дистанционным управлением, обеспечивающей пуск до 15 ракет в минуту с перенаведением по угловым координатам после каждого пуска [1,17].

Малогабаритная ракета «Ас» имеет двигатель на основе льдообразующего топлива, работающий на всей траектории полета, обеспечивающего реактивную тягу и формирование активных льдообразующих частиц. Такое совмещение функций реактивного двигателя и головной ча-



сти с реагентом позволило сократить габаритно-массовые характеристики по сравнению с аналогами в 5 раз, получить пологие траектории в радиусе ( $10,5 \pm 0,7$  км), из которых путь засева облаков достигает 9 км, сократить радиус «мертвой зоны засева» до 1,5 км. Высокая стартовая скорость (90 м/с) почти исключает влияние приземного ветра на точность полета. Дробление корпуса отработавшей ракеты без применения ВВ обеспечивает повышение безопасности транспортировки и применения.

В таблицах 1 и 2 приводятся технические характеристики наиболее совершенных противогорадовых ракет и ракетных установок.

Таблица 1

**Технические характеристики лучших противогорадовых ракет**

Технические характеристики	Алазань-6	Алазань-9	Лоза	Ас
Калибр, мм	82,5	60	55	57
Полетная длина изделия, мм	1402	1200	910	520
Полетная масса, кг	8,8	4,5	2,8	1,41
Стартовая скорость, м/с	26	50	65	80
Эффективный радиус действия, км	10,5	10,5	7,5	$10,5 \pm 0,7$
Длина пути засева в требуемом слое, км	7,0	6,0	4,5	$9,0 \pm 0,5$
Масса реагента, г	630	400	400	830
Количество AgI, г	26,4	36,0	40	16,6
Выход льдообразующих частиц:				
– при температуре минус 10 °С	$6,6 \cdot 10^{15}$	$6,6 \cdot 10^{15}$	$1,2 \cdot 10^{16}$	$1,6 \cdot 10^{16}$
– при температуре минус 6 °С	$2,0 \cdot 10^{15}$	$10^{15}$		$4,7 \cdot 10^{15}$
Продолжительность засева облаков, сек	$30 \pm 3$	$40 \pm 4$	30	$47 \pm 4$
Система обеспечения безопасности	взрывом	взрывом	взрывом	Без ВВ
Надежность системы самоликвидации	0,995	0,9995	0,955	0,9995
Безопасность для населения	0,9995	0,9995	-	0,9998

Таблица 2

**Технические характеристики противогорадовых ракетных установок**

Параметры ПУ	ТКБ-040	Элия	Элия-МР	Элия-2
Калибр, мм	83	57, 61, 83	83	57, 61, 83
Число направляющих, шт.	12	49, 36, 16	12	36, 20, 16
Габариты, мм:				
– длина;	2350	2250	2000	1850
– ширина;	2320	1700	1450	1100
– высота.	1980	1700	1200	1200
Масса с пультом управления, кг	670	650	340	$190 \pm 10$
Скорость наведения, град/с:	ручное,	$10 \pm 0,5$	ручное	$20 \pm 2,0$
Скорострельность ракет/мин	6	12	6	15
Управление	Ручное	Полуавтом.	Ручное	Автомат.

### 3. Создание средств радиолокационного обеспечения противогорадовых работ

3.1. Для радиолокационного обнаружения града на первом этапе развития противогорадовых работ были приспособлены радиолокаторы 3,2 и 10 см диапазона иного назначения (авиационные (Кобальт, Роз-1, ПСБН), корабельные (Лоза, Дон), станции орудийной наводки СОН-4 и СОН-9). На их основе в ВГИ были смонтированы двухволновые радиолокаторы с синхронным вращением антенн Град-1, Град-2, Град-3 (Ефимов В.Е., Кузнецов Ю.Ф., Соловьев В.И., Абшаев М.Т., Тхамоков Б.Х.). На базе метеорологического радиолокатора МРЛ-1, комплектующих спутникового радиолокатора и «СОН-4», а также вновь созданных двухволновых вращающихся переходов и трехволнового облучателя был смонтирован (Абшаев М.Т., Шамис М.П., Шапошников В.А., 1967 г.) экспериментальный трехволновый радиолокатор, который явился прототипом двухволнового радиолокатора градозащиты МРЛ-5 [7].

3.2. Решение о создании двухволнового радиолокатора МРЛ-5 для обеспечения противогорадовых работ с реализацией двухволнового и одноволнового методов индикации града и заменой множества смонтированных в примитивных условиях радиолокаторов Град-1, Град-2, Град-3 АРС-1, было принято на НТС ГУГМС при СМ СССР, проведенном академиком Федоровым Е.К. и начальником технического управления Рождественским Б.Г. в декабре 1968 г.

Радиолокатор МРЛ-5 был разработан во ВНИИРА (Г.Ф. Шевела, С.И. Ваксенбург, Г.В. Васильев) под научным руководством М.Т. Абшаева [7], отстоявшего его создание на базе энергично развивающейся в этот период микросхемотехники (а предлагались ламповый и транзисторный варианты).

Государственные испытания опытного образца «МРЛ-5», проведенные в 1972 г. на Куба-Табинском полигоне ВГИ, показали его высокую эффективность, но завод «Электромаш» (г. Горький, ныне Нижний Новгород) отказывался от его производства, ссылаясь на неосвоенность на заводе технологий микросхемотехники. Это удалось преодолеть в 1975 г. в результате организации обращений в ЦК КПСС, СМ СССР и Горьковский обком КПСС руководителей республик и краев, в которых осуществлялись противогорадовые работы.

В период 1976-1990 гг. было выпущено более 200 «МРЛ-5», из которых 96 были поставлены в ВС и ОВЧ Росгидромета, около 50 шт. – в сеть штормооповещения и НИИ Госкомгидромета, вплоть до Антарктиды и научных судов, около 35 шт. – в аэропорты ВВС МО и космодромы, около 50 шт. поставлены на экспорт в страны восточной Европы, Азии, Африки, на Кубу, Аргентину, Бразилию и др. Большинство этих «МРЛ-5» эксплуатируются до настоящего времени.

3.3. Важным этапом явилось создание и внедрение в практику ПГЗ программно-технических комплексов (ПТК) автоматизации обработки радиолокационной информации и управления

противоградовыми операциями «АСУ «Антиград» (1993 г.), «Мерком» (1994 г.), «АСУ-МРЛ» (2005 г.) и «АСУ-ДМРЛ-10» (2015), которые обеспечивают повышение информативности МРЛ [1]. Например, встраивание в «МРЛ-5», отработавшие по 25 – 40 лет, аппаратной части ПТК «АСУ-МРЛ» обеспечивает их глубокую модернизацию за счет замены выработавших ресурсы аналоговых блоков и узлов на цифровые устройства (синхронизатор, приемник, датчики угловой информации, блок управления электроприводом антенны, аппаратура первичной и вторичной обработки информации [5]).

В результате такой модернизации обеспечивается высокая надежность функционирования, повышение метеопотенциала МРЛ, снижение энергопотребления, автоматизация радиолокационных наблюдений, передача радиолокационной информации удаленным потребителям и продление срока службы.

Программное обеспечение «АСУ-МРЛ» позволяет автоматизировать противоградовые операции, включая обнаружение градовых и градоопасных облаков, распознавание категорий объектов воздействия, выработку команд на ракетный засев и документирования первичных данных радиолокационных наблюдения, параметров облаков и материалов воздействия на градовые процессы (рис. 6).

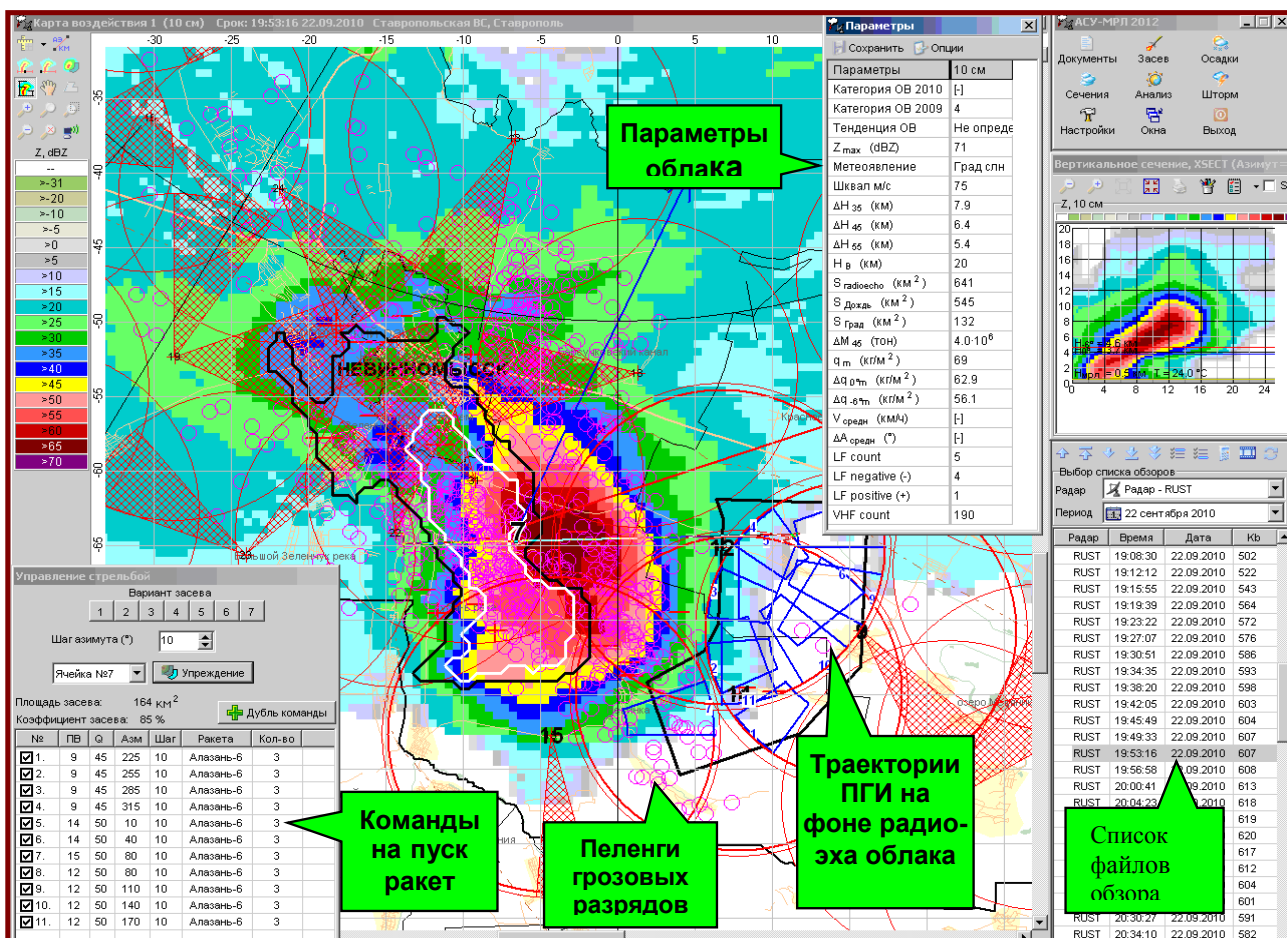


Рис. 6. Карта воздействия с командами на ракетный засев суперячейкового градового облака и пеленгами грозовых разрядов.

3.4. В 2010-2015 гг. АО «Лианозовский электромеханический завод концерна «Алмаз-Антей» по ТЗ Росгидромета, созданы (В.С. Ефремов, И.С. Вылегжанин) и осуществляется серийное производство новых метеорологических радиолокаторов:

А) Многопараметровый доплеровский радиолокатор «ДМРЛ-С» 5,3 см диапазона, с двойной поляризацией и программным обеспечением «Гимет-2010», разработанным ВГИ (А.В. Шаповалов) на базе которого создается государственная сеть штормооповещения, метеообеспечения авиации и геофизического мониторинга.

Б) Трассовый радиолокационный комплекс (ТРЛК) «Сопка-2» 11 см диапазона, с антенной фазированной решеткой и доплеровской обработкой сигналов, в который встроен метеорологический канал. Программное обеспечение метеоканала создано НПЦ «Антиград» (А.М. Абшаев) и предназначено для метеорологического обеспечения авиации и управления противогодовыми операциями [13].

В) Доплеровский радиолокатор «ДМРЛ-10» 10 см диапазона [2,14], предназначенный для обеспечения противогодовыми работ и штормооповещения в регионах с интенсивными грозовыми процессами (рис. 7), где информация на длине волны 5,3 см может искажаться за счет ослабления. Его программное обеспечение «АСУ-ДМРЛ-10» разработано ВГИ (А.М. Абшаев) и реализует современную автоматизированную технологию ПГЗ.



Рис. 7. Радиолокаторы, оснащенные программой автоматизации противогодовыми операциями.

Таким образом, система противогодовой защиты Росгидромета в настоящее время располагает современными радиолокаторами, ракетными комплексами и средствами автоматизации, которые по ряду параметров превосходят мировые аналоги.

#### 4. Результаты и перспективы развития противоградовых работ

4.1. В настоящее время в Российской Федерации производственная защита сельскохозяйственных культур от градобитий осуществляется на площади 2,65 миллиона га с применением автоматизированной ракетной технологии. Защиту проводят Краснодарская, Ставропольская и Северо-Кавказская Военизированные службы (ВС) Росгидромета, имеющие 11 командных и 173 ракетных пункта. В целом защита от градобитий осуществляется успешно, хотя отмечаются случаи, когда на защищаемых территориях (ЗТ) ВС Росгидромета градобития наносят серьезный ущерб.

4.2. Оценка эффективности ПГЗ, проведенная по единой методике (А.М. Малкарова) с использованием данных о площадях градобитий, степени повреждений сельхозкультур и стоимости урожая, выданных органами сельского хозяйства – заказчиками работ, показала, что *физическая эффективность ПГЗ* в Российской Федерации повышалась по мере совершенствования технологии и технических средств и достигла в среднем 87 %, т.е. ущерб на защищаемых территориях сокращается в 7,7 раза. *Суммарный экономический эффект* в 2016 г. достиг 4,3 млрд. руб., окупив расходы в 9,2 раза.

Оценка экономической эффективности проведена без учета того, что на Северном Кавказе около 50% агропромышленной продукции дают приусадебные хозяйства. Если учесть этот фактор, то экономическая эффективность и окупаемость затрат увеличатся в два раза.

Примерно такая же эффективность ПГЗ достигается в странах СНГ (Украина, Молдавия, Таджикистан, Узбекистан) и Аргентине, где применяются российские технологии и технические средства ПГЗ, на площади около 3,2 млн. га.

Республики и края Северного Кавказа планируют расширить площадь противоградовой защиты до 2020 г. на 936 тысяч га, для чего необходимо создать около 70 новых ракетных пунктов и один командный пункт.

4.3. Наряду с этими успехами следует отметить ряд научных, технических и организационных проблем применяемой системы ПГЗ.

В первую очередь, это касается дальнейшего развития физических принципов и методов воздействия на градовые процессы на основе их теоретических, лабораторных и полевых исследований. В этом плане в ФГБУ «ВГИ» в рамках раздела 1.6.5 ЦНТП Росгидромета ведутся целенаправленные работы по совершенствованию метода воздействия на сверхмощные градовые процессы, расширению функций системы ПГЗ для предотвращения сопутствующих градобитиям опасным явлениям и увеличению осадков в засушливые периоды сезона ПГЗ.

Во-вторых, техническое оснащение ВС Росгидромета почти не обновлялось с 1990 г. и не обеспечивает полного выполнения требований технологии воздействия на сверхмощные крупномасштабные градовые процессы:

- применяемые радиолокаторы «МРЛ-5» (1976-1988 г выпуска) требуют или глубокой модернизации, или замены на новый радиолокатор «ДМРЛ-10»;
- требуют обновления системы управления противоградовыми операциями;
- применяемые ракетные установки с ручным управлением не обеспечивают требуемый темп засева мощных и быстротечных градовых процессов;
- наличие запретных секторов и непротреливаемых участков на ЗТ, связанных с наличием у ПГИ Алазань-6 «мертвой зоны засева» диаметром 8-9 км;
- высокая цена применяемых ПГИ семейства «Алазань» не позволяет приобрести требуемое их количество и вынуждает экономить ракеты, что приводит к недозасеву облаков. Поэтому в случае сверхмощных быстротечных крупномасштабных градовых процессов не всегда удается полностью предотвратить градобитие.

Для устранения этих проблем в 2014-2016 гг. ФГБУ «ВГИ» на базе Северо-Кавказской ВС создан (А.М. Абшаев, М.Т. Абшаев, Х.Х. Чочаев) действующий образец ПТК автоматизированного (роботизированного) комплекса «АСУ-Град» [1], который обеспечивает требуемый темп засева градовых процессов, в том числе, и сверхмощных крупномасштабных градовых процессов. В состав «АСУ-Град» (рис. 8) входит:

- радиолокатор «ДМРЛ-10» или модернизированный радиолокатор «МРЛ-5М», имеющие современную программу управления противоградовыми операциями;
- программно-технические комплексы управления «АСУ-МРЛ» или «АСУ-ДМРЛ-10», обеспечивающие автоматизацию противоградовых операций;
- сеть автоматизированных ракетных установок «Элия-2»;
- система управления удаленными ракетными установками «АСУ-Элия»;
- малогабаритные противоградовые ракеты «Ас» и «Алазань-9»;
- система связи и управления на базе радиомодемов УКВ связи.

Апробация ПТК «АСУ-Град» на практике показала ее функционирование в соответствии с заложенными в нее алгоритмами и возможность реализации малолюдной, более дешевой системы ПГЗ.

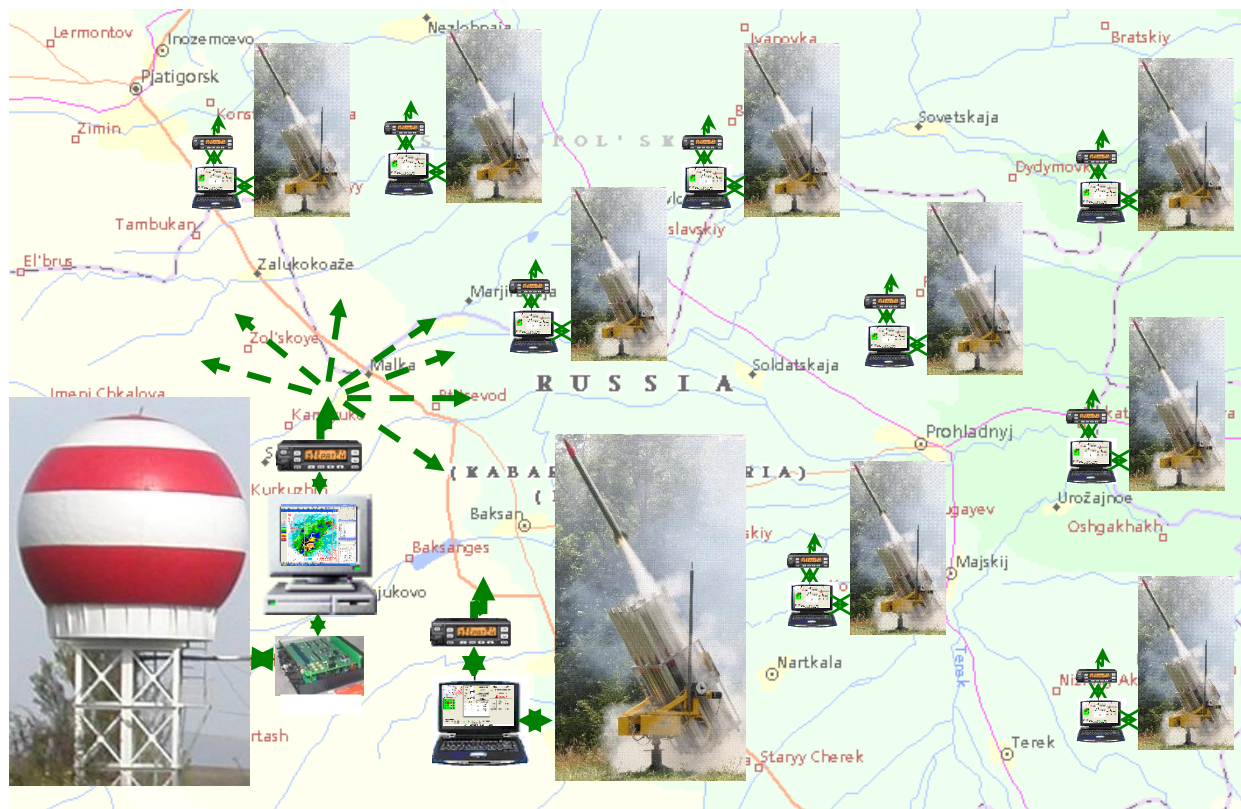


Рис. 8. Схема автоматизированного комплекса ПГЗ «АСУ-Град» с одним ракетным пунктом (их число может быть до 32 шт. и более).

Подобные системы управления с применением автоматизированных ракетных комплексов уже создаются во многих странах (Сербия, Босния и Герцеговина, Китай, Грузия и др.).

Предложения ФГБУ «ВГИ» по техническому переоснащению противоградовых работ было рассмотрено на коллегии Росгидромета в декабре 2016 г., решением которого рекомендовано проведение испытаний ПТК «АСУ-Град», по результатам которых будет решаться вопрос его внедрения в практику ПГЗ.

Внедрение автоматизированных систем ПГЗ, по-видимому, позволит провести оптимизацию организационной структуры ВС Росгидромета с целью некоторого сокращения числа противоградовых отрядов, численности персонала и повышения его оплаты труда.

В таблице 3 приведен список разработчиков и поставщиков основных методов и технических средств ПГЗ.

**Таблица 3. Разработчики и поставщики основных методов и технических средств противорадовой защиты**

Наименование метода и технического средства	Организации разработчики	Автор, научный руководитель	Главный конструктор	Годы разработки	Завод серийного производства
Артиллерийский метод ПГЗ	ВГИ, Нальчик	Г.К. Сулаквелидзе	-	1956 - 1962	-
Метод прогноза града	ВГИ, Нальчик	Н.И. Глушкова		1663 – 1966	
Двухволновый и одноволновый методы обнаружения града	ВГИ, Нальчик	М.Т. Абшаев	-	1964 – 1966	
Ракетный метод ПГЗ	ЦАО, Долгопрудный; ИГАН Грузинской ССР, Тбилиси	И.И. Гайворонский, Ю.А. Серегин, А.И. Карцивадзе	-	1956 – 1962	
Комбинированный артиллерийский метод ПГЗ	ВАКНИИ, Тбилиси	В.П. Ломинадзе, Я.Т. Бартишвили, Ш.Л. Гудушаури	-	1961 – 1964	
Артиллерийские противорадовый снаряд «Эльбрус-4»	ВГИ, Нальчик; НИИ машиностроения, Москва	Г.К. Сулаквелидзе	Я.С. Чупров, Р.Н. Станков	1960 – 1962	Невьянский механический завод, Невьянск
Артиллерийский противорадовый снаряд «Эльбрус-3»		Г.К. Сулаквелидзе		1965 – 1968	
Дистанционные взрыватели ДВЭ-2, ДВЭ-3, ВДМ-1		Г.К. Сулаквелидзе	Г.А. Окунь	1966 – 1970	
Противорадовый комплекс «ПГИ-М»	ЦАО, Долгопрудный; НИИ «Теплотехники», Москва	И.И. Гайворонский, Ю.А. Серегин	Н.Г. Карягин	1956 – 1958	Краснозаводский химический завод
Противорадовый комплекс «Облако»	ЦАО, Долгопрудный; НПО «СПЛАВ», Тула	И.И. Гайворонский, Ю.А. Серегин	А.Н. Ганичев, В.И. Дмитриев	1961 – 1963	
Противорадовые ракеты «Алазань-1» «Алазань-2М» и «Алазань-2М1Ст»	ИГАН Грузинской ССР; НИИПХ, Сергиев Посад	А.И. Карцивадзе	Н.С. Силин, А.И. Годораж, П.А. Несмеянов, А.И. Сидоров	1966 – 1969	ЧПО им. Чапаева, (г. Чебоксары); Краснозаводский химический завод
Ракетные установки ТКБ-01, ТКБ-04, ТКБ-06, ТКБ-040	ЦАО, Долгопрудный; ИГАН Грузинской ССР; СКБ «СКИФ», Тула	И.И. Гайворонский, А.И. Карцивадзе		1958, 1962, 1963, 1969	Кишиневский электромеханический завод
Двухволновый радиолокатор градозащиты «МРЛ-5» (шифр НИОКР «Радиоград»)	ВГИ, Нальчик; ВНИИРА, Ленинград	М.Т. Абшаев	Г.Ф. Шевела, С.И. Ваксенбург, Г.В. Васильев	1968 – 1972	Завод «Электромаш», Нижний Новгород
Унифицированная технология ПГЗ на базе концепции ускорения осадкообразования	ВГИ, Нальчик	М.Т. Абшаев	-	1966 - 1984	
Блок обработки и многоконтурного отображения «БОМО»	ВГИ, Нальчик; ВНИИРА, Ленинград	М.Т. Абшаев	М.Ю. Пашкевич, Ф.И. Бурдаков, Г.Ф. Шевела	1975 – 1976	Завод «Раздан», Армения, Завод «Электромаш»



1	2	3	4	5	6
Методы прогноза мезорайона развития, типа и интенсивности градовых процессов	ВГИ, Нальчик; НПЦ «Антиград», Нальчик	Л.М. Федченко, Г.Г. Гораль, М.В. Баркова и др.	-	1981 – 1995	-
Противоградовая ракета «Небо»	НПЦ «Антиград», Нальчик; НПО «Сплав», Тула,	М.Т. Абшаев	А.Н. Ганичев, В.Х. Азиев	1981 – 1985	Краснозаводский ский завод
Ракетная установка «МС-280»	Завод им. Калинина, Екатеринбург	М.Т. Абшаев	О.Н. Кривошапка	1981 – 1985	Дубоссарский ский завод
Ракетный противоградовый комплекс «Кристалл»	НПЦ «Антиград»; НИИПХ	М.Т. Абшаев	П.А. Несмеянов	1981 – 1986	ЧПО им. Чапаева, Чебоксары
Ракетная установка «ТКБ-0183»	СКБ «СКИФ»	М.Т. Абшаев	А.А. Васильев, В.В. Бехтяков	1981 – 1986	Завод им. Кирова, Тирас
Ракеты «Алазань-ЧМ15», «Алазань-5», «Алазань-6»	НПЦ «Антиград»; ВНИИП «ДАРГ»; ЧПО им. Чапаева	М.Т. Абшаев, В.С. Поносов	П.А. Несмеянов, Б.Н. Дубинин	1996 – 2002	ЧПО им. Чапаева, Чебоксары
Автоматизированная система ПГЗ АСУ «Антиград»	НПЦ «Антиград»	М.Т. Абшаев	М.Т. Абшаев, В.О. Тапасханов	1990 – 1993	НПЦ «Антиград»
Автоматизированная технология ПГЗ	НПЦ «Антиград»	М.Т. Абшаев	А.М. Абшаев	1991 – 1994	
Автоматизированная система ПГЗ «Мерком»	ООО «Экотехнология»	М.Д. Атабиев	А.В. Капитанников А.В. Шаповалов	1992-1994	ООО Экотехнология, г. Ставрополь
Автоматизированный ракетный комплекс «Алан-2»	НПЦ «Антиград»; АО «НПО «Искра»; АО «НИ- ИПМ»; АО «Мотовилихинские заводы»	М.Т. Абшаев Б.К. Кузнецов, Н.И. Михеев	М.И. Соколовский, Г.А. Зыков, Е.И. Иоффе, А.П. Шварев	1997 – 2000	АО «НИИПМ»; АО «Мо- товилихинские заводы», г. Пермь
Ракетные установки «Элия» и «Элия-МР»	НПЦ «Антиград», АО «Телемеханика»	М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев	Б.К. Кузнецов, В.М. Черкашин	2001-2005	АО «Телемеханика», Наль
Автоматизированная система управления ПГЗ «АСУ-МРЛ»	НПЦ «Антиград»	М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев	А.Ф. Котелевич, Н.В. Сирота	2005-2006	НПЦ «Антиград»
Автоматизированная ракетная установка «Элия-2»	НПЦ «Антиград»	М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев	Б.К. Кузнецов, А.М. Абшаев	2007-2008	НПЦ «Антиград»
Малогобаритная ракета «Алазань-9»	Агентство «АНО АТТЕХ», ФНЦП «НИИПХ»	В.П. Корнеев	П.А. Несмеянов	2011-2013	ЧПО им. В.И. Чапаева
Малогобаритная ракета «Ас»	НПЦ «Антиград», ВПП «ИРВИС», АО «НИИПМ»	М.Т. Абшаев, Д.В. Кратиров, А.Е. Голу	Н.И. Михеев, В.А. Зорин	2007 - 2015	АО «НИИПМ»
Метеоканал ТРЛК «Сопка-2»	АО НПО «ЛЭМЗ», НПЦ «Антиград»	А.М. Абшаев, М.Т. Абшаев	В.С. Ефремов И.С. Вылегжанин	2011-2012	АО НПО «ЛЭМЗ»
ПТК «АСУ-Элия»	НПЦ «Антиград»	А.М. Абшаев	А.М. Абшаев	2011-2012	НПЦ «Антиград»
ПТК «АСУ-Град»	ФГБУ «ВГИ»	М.Т. Абшаев	А.М. Абшаев	2014-2015	ФГБУ «ВГИ»
Радиолокатор «ДМРЛ-10» с программой «АСУ-ДМРЛ-10»	АО НПО «ЛЭМЗ», ФГБУ «ВГИ»	М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев	И.С. Вылегжнин	2013-2015	АО НПО «ЛЭМЗ»

### *Список литературы*

1. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Малкарова А.М., Барекова М.В. Руководство по организации и проведению противорадовых работ. – Нальчик, Печатный двор, 2014. – 508 с.
2. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Ефремов В.С., Вылегжанин И.С. Новые радиолокаторы для исследований и активного воздействия на облака // Сборник трудов 2<sup>-й</sup> межд. конф. «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь, 2015. – С. 265-271.
3. Абшаев М.Т. Радиолокационное обнаружение града // Изв. Ан. СССР, ФАО, 1982, том 18, № 5. – С. 483-494.
4. Абшаев М.Т., Азиев В.Х., Бурцев И.И., Володин А.И., Кривошапка О.Н., Кузнецов Б.К., Несмеянов П.А.. Новые противорадовые комплексы «Небо» и «Кристалл» // Труды Всес. конф. по АВ на гидрометпроцессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 476-483.
5. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации для целей штормооповещения и АВ на облака // Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб, 2011. – С. 211-225.
6. Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. – СПб.: Гидрометеиздат, 2006. – 287 с.
7. Абшаев М.Т., Шевела Г.Ф., Васильев Г.Ф., Ваксенбург С.И. и др. Метеорологический двухволновый радиолокатор. – А.С. СССР № 487589 с приоритетом от 5.03.1974.
8. Абшаев М.Т., Зорин В.А., Зыков Г.А., Иоффе Е.И., Конюхов И.В., Могильников О.В., Соколовский М.И., Талалаев А.П., Шварев Р.Я. Автоматизированный ракетный противорадовый комплекс нового поколения «Алан» // Доклады Всерос. конф. по ФО и АВ на гидрометпроцессы. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – С. 58-66.
9. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В, Федченко Л.М.. Математическое моделирование градовых облаков // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производственных работ по защите от града. – Нальчик, 2011. – С. 137-144.
10. Бартишвили И.Г., Бартишвили Г.С., Гудушаури Ш.Л., Ломинадзе В.П. К вопросу комбинированного воздействия на теплую и переохлажденную часть облака с целью предотвращения града // Труды ЗакНИГМИ, 1967. Вып. 2. – С. 7-22.

11. Бухникашвили А.В., Гайворонский И.И., Карцивадзе А.И., Кизирия Б.И., Окуджава А.М., Орджоникидзе А.А., Серегин Ю.А. Методика АВ на градовые процессы и результаты опытов в Алазанской долине // Труды Всес. совещ. по АВ на градовые процессы. – Тбилиси, 1964. – С. 76-87.
12. Емельянов В.Н., Несмеянов П.А., Эрландц Н.Ю., Шакиров И.Н. Состояние работ по созданию противорадовых ракет нового поколения // Труды научно-практической конф., посв. 40-летию начала производственных работ по защите от града. – Нальчик, 2011. – С. 279-281.
13. Ефремов В.С., Вылегжанин И.С., Соловьев А.Е., Оприков Е.М., Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Тезадов С.М. Метеорологический канал трех координатного трассового радиолокационного комплекса двойного назначения «Сопка-2» // Труды II Всерос. научной конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Том. I. – СПб.: 2012. – С. 381-386.
14. Ефремов В.С., Вылегжанин И.С. Проспект ДМРЛ-10.– АО «ЛЭМЗ», 2015. – 2 с.
15. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. - 412 с.
16. Федоров Е.К. Активные воздействия на метеорологические процессы // Вестник АН СССР, 1962. – № 9. – С. 73-78.
17. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Sulakvelidze G.K., Burtsev I.I., Malkarova A.M., Nesmeyanov P.A., etc. Development of rocket and artillery technology of hail suppression // «Book of Achievements in Weather Modification». – UAE: Abu Dhabi. – 2006. – P. 109-127.
18. Varenyh N.M., Emeliyanov V.N., Nesmeyanov P.A., Korneev V.P., Reznikov M.S., Koloskov B.P. Russian Technical means for Weather Modification. // 10th WMO Sci. Conf. on Weather Mod., Bali, Indonesia, 2011.

# СЕКЦИЯ 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЛАКО- И ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ

## 1.1. Численное моделирование облачных процессов

### ОПЕРАТИВНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ГИГРОСКОПИЧЕСКИМИ И ЛЬДООБРАЗУЮЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ НА ВНУТРИМАССОВУЮ КОНВЕКТИВНУЮ ОБЛАЧНОСТЬ. КОНЦЕПЦИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пастушков Р.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный,

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, г. Москва

Одной из актуальных задач прикладной физики облаков и активных на них воздействий является разработка оперативных численных моделей эволюции конвективных облаков при естественном цикле их развития и при активных воздействиях на них с целью регулирования режима выпадения осадков. Требование оперативности (возможности получения результата за десятки секунд, максимум за минуты) накладывает достаточно серьёзные ограничения на структуру таких моделей. В результате использование в этих целях трёхмерных моделей конвективных облаков (см., например, [1 – 5, 9, 11, 14]) в настоящее время практически исключено по причине довольно высоких их требований к вычислительным ресурсам. Отметим, что для получения результата такого вида моделирования даже на суперкомпьютерах и при использовании современных методов программирования требуются часы процессорного времени. С другой стороны, модели облачной конвекции класса частицы или одномерные, удовлетворяя условиям оперативности, являются неоправданно искажающими моделируемые процессы.

В некотором смысле промежуточное положение занимают т. н. полуторамерные модели (см., например, [6, 10, 12, 13, 15, 16]). Они, являясь в сущности трёхмерными и рассчитывая радиально осреднённые параметры облака и окружающей атмосферы (правда, с осевой симметрией), позволяют удовлетворить вышеприведённым требованиям оперативности. Этот класс моделей был введён пионерскими работами [10, 12, 13]. Значительный вклад в практическое использование этих моделей был внесён работами ГГО [6].

Как уже было отмечено, современные полуторамерные модели рассчитывают вертикально-временную эволюцию параметров облака и окружающей атмосферы, осреднённых по их горизонтальным сечениям. В результате такого осреднения исходных уравнений облачной

конвекции, как и при любом другом осреднении (например, при осреднении по Рейнольдсу), возникает проблема замыкания новой полученной системы уравнений, порождаемая тем, что число полученных уравнений становится меньше числа входящих в них неизвестных, подлежащих определению. Как следствие, возникает необходимость введения некоторого числа дополнительных соотношений, рабочих гипотез или ограничений. Основные из них в настоящее время сводятся к следующим.

В получаемой осреднённой системе уравнений, описывающей вертикально-временную эволюцию параметров облака и окружающей атмосферы, пренебрегается действием возмущения давления. С одной стороны, такая рабочая гипотеза позволяет достаточно просто с использованием уравнения неразрывности рассчитывать поле нисходящих компенсационных движений и вносит свой вклад в возможность разделения всей задачи на две независимые: расчёт эволюции только параметров облака (причём без расчёта горизонтальных в нём скоростей) и отдельно параметров окружающей атмосферы. В результате появляется возможность для сокращения времени решать задачу об эволюции только облачного пространства.

С другой стороны, такой подход, строго говоря, эквивалентен утверждению о том, что поле давления в области облачной конвекции является результатом возникающей циркуляционной системы (подстраивается под неё), что, естественно, противоречит гидродинамике и исходной системе уравнений облачной конвекции, когда поля скоростей и давления эволюционируют одновременно. Кроме того, неоднократно проведённые оценки показывают, что действие поля возмущения давления, по крайней мере, в центральной части облака сопоставимо с действием сил плавучести, а под и над этой частью и сбоку от неё является преобладающим. Таким образом, исключение поля давления нельзя считать не вносящим серьёзные искажения в результаты численного моделирования. Следует, конечно, отметить, что в ряде выполненных работ (см., например, [15, 16]) это ограничение устранено.

Вторая, используемая гипотеза состоит в задании заранее абсолютно неизвестного коэффициента, регулирующего гидродинамическое взаимодействие двух разделённых областей.

Третьим, обычно используемым предположением, является назначение постоянного радиуса облака  $a$  (или отношения  $\alpha = a / b$ , где  $b$  – радиус всей рассматриваемой области).

Таким образом, результат моделирования становится зависимым (даже если не считать пренебрежение действием возмущения поля давления) от двух параметров: назначаемого радиуса облака и коэффициента, определяющего гидродинамическое взаимодействие двух разделённых областей облачной конвекции (внутренней, т.е. собственно облака, и окружающей атмосферы). При ясном понимании этих проблем в своё время [10] была произведена оценка этого влияния. Было получено, что существуют значения параметра  $\alpha^2 = a^2 / b^2 \approx 0.04 - 0.09$  (величина  $a$  постоянна), при которых облачная конвекция развивается наиболее интенсивно.

Цель настоящего доклада – представить новый подход к построению полуторамерных моделей облачной конвекции, позволяющий не только отказаться от пренебрежения влиянием возмущения поля давления, но и от достаточно проблематичных предположений о постоянстве по высоте и времени горизонтального размера облака и механизме его гидродинамического взаимодействия с окружающей атмосферой.

Для облегчения дальнейших выкладок запишем систему уравнений облачной конвекции в отклонениях от начальных значений в упрощенном виде (без учёта турбулентного обмена и параметризации микрофизических процессов). Обозначения общепринятые.

$$\frac{\partial(\rho_0 u)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru\rho_0 u) + \frac{\partial}{\partial z}(w\rho_0 u) = -\frac{\partial p}{\partial r}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 w)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru\rho_0 w) + \frac{\partial}{\partial z}(w\rho_0 w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + g \left( \frac{\vartheta}{T_0} + 0.61q - Q \right), \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho_0 u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_0 w), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru\vartheta) + \frac{\partial}{\partial z}(w\vartheta) = (\gamma_T - \gamma_{ba}) w, \quad (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ruq) + \frac{\partial}{\partial z}(wq) = \gamma_Q w - M, \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ruQ) + \frac{\partial}{\partial z}(wQ) = M \quad (6)$$

В дальнейшем, наряду с уравнением сохранения массы (3) будем использовать и его следствие: уравнение для возмущения поля давления

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = F(r, z, t) \quad (7)$$

$$F = \frac{\partial}{\partial z} g \left( \frac{\vartheta}{T_0} + 0.61q - Q \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\partial}{\partial r}(ru\rho_0 u) + \frac{\partial}{\partial z}(ru\rho_0 w) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r(w\rho_0 u) + \frac{\partial}{\partial z}(w\rho_0 w) \right]$$

Система (1) – (7) рассматривается в области  $0 \leq r \leq b$ ,  $0 \leq z \leq H$  при граничных  
вях

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial r}(0, z, t) = 0, \quad w(b, z, t) = 0, \quad u(0, z, t) = 0, \quad u(b, z, t) = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial r}(0, z, t) = 0, \quad \varphi(b, z, t) = 0, \quad \varphi \equiv p, \vartheta, q, Q, \\ w(r, 0, t) = 0, \quad u(r, 0, t) = 0, \quad w(r, H, t) = 0, \quad u(r, H, t) = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z}(r, 0, t) = 0, \quad \varphi(r, H, t) = 0, \quad \varphi \equiv \vartheta, q, Q, \\ \frac{\partial p}{\partial z}(r, 0, t) = g \left( \frac{\vartheta}{T_0} + 0.61q - Q \right) \Big|_{z=0}, \quad p(r, H, t) = 0 \end{aligned}$$

Применим к (1) – (7) процедуру осреднения по площади горизонтального сечения облака с изменяющимся по высоте и времени радиусом  $a(z, t)$  и по кольцевой области  $a \leq r \leq b$ . Эта процедура сводится к применению к (1) – (7) операторов

$$\frac{1}{\pi a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} [(1) - (7)] d\lambda dr, \quad \frac{1}{\pi(b^2 - a^2)} \int_a^b \int_0^{2\pi} [(1) - (7)] d\lambda dr$$

Значение  $r_0 = a(z, t)$  будем определять из условия  $w(r_0, z, t) = 0$ , которое с использованием уравнения неразрывности и принятых граничных условий приводит к соотношению

$$a(z, t) = \left( \frac{\overline{w_b}}{\overline{w_a} + \overline{w_b}} \right)^{1/2} b \quad (8)$$

В результате, вводя для осреднённых значений обозначения  $\overline{y_a} = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} r y d\lambda dr$ ,  $\overline{y_b} = \frac{1}{\pi(b^2 - a^2)} \int_a^b \int_0^{2\pi} r y d\lambda dr$ , где  $y = u, w, p, \theta, q, Q$ , и используя условия  $w(a(z, t), t) = 0$ ,  $Q(a(z, t), t) = 0$ , получим две связанные между собой системы уравнений.

$$\frac{\partial(\rho_0 \overline{u_a})}{\partial t} + \frac{2}{a} \overline{u_a}^2 + \frac{2}{a^2} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^a \rho_0 r u w dr = - \frac{2}{a^2} \int_0^a r \frac{\partial p}{\partial r} dr \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 \overline{w_a})}{\partial t} + \frac{2}{a^2} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^a \rho_0 r w^2 dr = - \frac{\partial \overline{p_a}}{\partial z} \quad (10)$$

$$a \rho_0 \overline{u_a} + \frac{\partial}{\partial z} \rho_0 \overline{w_a} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \overline{\vartheta_a}}{\partial t} + \frac{2}{a} \overline{u_a} \overline{\vartheta_a} + \frac{2}{a^2} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^a r w \vartheta dr = (\gamma_T - \gamma_{ba}) \overline{w_a} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \overline{q_a}}{\partial t} + \frac{2}{a} \overline{u_a} \overline{q_a} + \frac{2}{a^2} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^a r w q dr = \gamma_Q \overline{w_a} - \overline{M_a} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \overline{Q_a}}{\partial t} + \frac{2}{a^2} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^a r w Q dr = \overline{M_a} \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{p}_a}{\partial z^2} + \frac{2}{a} \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=a} = \frac{\partial}{\partial z} g \left( \frac{\bar{g}_a}{T_0} + 0.61 \bar{q}_a - \bar{Q} \right) - \frac{2}{a^2} \left[ a \frac{\partial}{\partial r} (\rho_0 u^2) + \rho_0 u^2 \right] \Big|_{r=a} - \frac{4}{a^2} \frac{\partial}{\partial z} (a \rho_0 u w) \Big|_{r=a} - \frac{2}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( \rho_0 \int_0^a r w^2 dr \right), \quad (15)$$

$$\frac{\partial (\rho_0 \bar{u}_b)}{\partial t} + \frac{2}{a} u_b^2 + \frac{2}{(b^2 - a^2)} \frac{\partial}{\partial z} \int_a^b \rho_0 r u w dr = - \frac{2}{(b^2 - a^2)} \int_a^b r \frac{\partial p}{\partial r} dr \quad (16)$$

$$\frac{\partial (\rho_0 \bar{w}_b)}{\partial t} + \frac{2}{(b^2 - a^2)} \frac{\partial}{\partial z} \int_a^b \rho_0 r w^2 dr = - \frac{\partial \bar{p}_b}{\partial z} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \bar{g}_b}{\partial t} + \frac{2}{a} u_b g_b + \frac{2}{(b^2 - a^2)} \frac{\partial}{\partial z} \int_a^b r w g dr = (\gamma_T - \gamma_{ba}) \bar{w}_b \quad (18)$$

$$\frac{\partial \bar{q}_b}{\partial t} + \frac{2}{a} u_b q_b + \frac{2}{(b^2 - a^2)} \frac{\partial}{\partial z} \int_a^b r w q dr = \gamma_Q \bar{w}_b \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{p}_b}{\partial z^2} + \frac{2a}{(b^2 - a^2)} \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=a} = \frac{\partial}{\partial z} g \left( \frac{\bar{g}_b}{T_0} + 0.61 \bar{q}_b \right) + \frac{2}{(b^2 - a^2)} \left[ a \frac{\partial}{\partial r} (\rho_0 u^2) + \rho_0 u^2 \right] \Big|_{r=a} + \frac{4}{(b^2 - a^2)} \frac{\partial}{\partial z} (a \rho_0 u w) \Big|_{r=a} - \frac{2}{(b^2 - a^2)} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( \rho_0 \int_a^b r w^2 dr \right) \quad (20)$$

Схематически постановка задачи представлена на рис. 1.

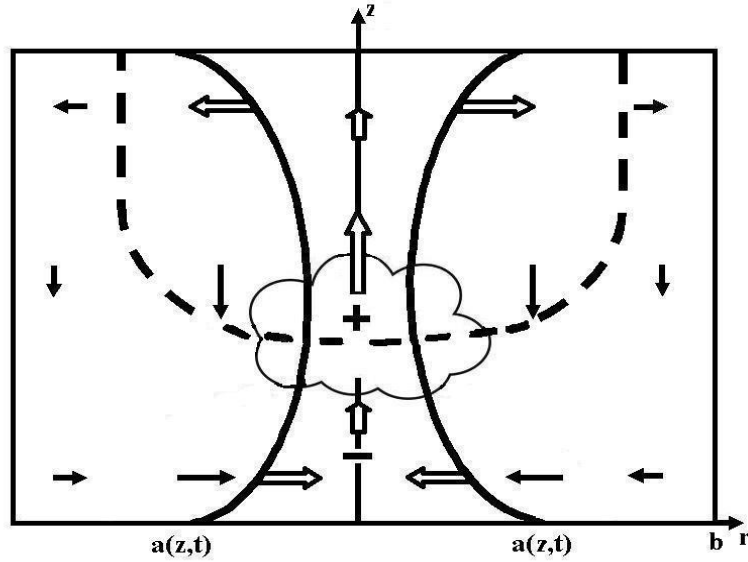


Рис. 1. Схематическое представление циркуляционной системы облачной конвекции в осесимметричной системе координат. Знакам + и - отмечены зоны положительных и отрицательных возмущений давления.

Система (8) – (20) помимо осреднённых значений  $\bar{\varphi}_a, \bar{\varphi}_b$ ,  $\varphi \equiv (u, w, p, g, q, Q)$  содержит ряд слагаемых, определяемых исходными не осреднёнными значениями



$\varphi \equiv (u, w, p, \mathcal{G}, q, Q)$ . Для замыкания системы эти слагаемые необходимо записать в терминах  $\overline{\varphi_a}, \overline{\varphi_b}$ . Применим для этого технику, известную в вычислительной математике, как метод реконструкции. Зависимость каждого не осреднённого параметра от радиальной координаты будем описывать кубическими сплайнами.

Например, для вертикальной скорости  $w$  будем полагать

$$w(r, z, t) = \begin{cases} P_3^{(wa)} = A_3^{(w)} r^3 + A_2^{(w)} r^2 + A_1^{(w)} r + A_0^{(w)}, & 0 \leq r \leq a, \\ P_3^{(wb)} = B_3^{(w)} r^3 + B_2^{(w)} r^2 + B_1^{(w)} r + B_0^{(w)}, & a \leq r \leq b. \end{cases}$$

Для определения  $A_i^{(w)}, B_i^{(w)}, i = \overline{0-3}$  будем использовать условия

$$\left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r=b} = 0, \quad \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} r P_3^{(wa)}(r) dr d\lambda = \overline{w_a}, \quad \frac{1}{\pi(b^2 - a^2)} \int_a^b \int_0^{2\pi} r P_3^{(wb)}(r) dr d\lambda = \overline{w_b},$$

$$P_3^{(wa)}(a) = 0, \quad P_3^{(wb)}(a) = 0, \quad \frac{\partial P_3^{(wa)}}{\partial r}(a) = \frac{\partial P_3^{(wb)}}{\partial r}(a).$$

Для радиальной скорости  $u$  будем полагать

$$u(r, z, t) = \begin{cases} P_3^{(ua)} = A_3^{(u)} r^3 + A_2^{(u)} r^2 + A_1^{(u)} r + A_0^{(u)}, & 0 \leq r \leq a, \\ P_3^{(ub)} = B_3^{(u)} r^3 + B_2^{(u)} r^2 + B_1^{(u)} r + B_0^{(u)}, & a \leq r \leq b. \end{cases}$$

Для определения  $A_i^{(u)}, B_i^{(u)}, i = \overline{0-3}$  будем использовать условия

$$u|_{r=0} = 0, \quad \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} r P_3^{(ua)}(r) dr d\lambda = \overline{u_a}, \quad \frac{1}{\pi(b^2 - a^2)} \int_a^b \int_0^{2\pi} r P_3^{(ub)}(r) dr d\lambda = \overline{u_b},$$

$$P_3^{(ua)}(a) = u_a, \quad P_3^{(ub)}(a) = u_a, \quad \frac{\partial P_3^{(ua)}}{\partial r}(a) = \frac{\partial P_3^{(ub)}}{\partial r}(a), \quad u|_{r=b} = 0, \quad \frac{\partial P_3^{(ub)}}{\partial r}(b) = 0.$$

Для возмущений давления  $p$ , температуры  $\mathcal{G}$  и влажности  $q$  будем полагать

$$\varphi(r, z, t) = \begin{cases} P_3^{(\varphi a)} = A_3^{(\varphi)} r^3 + A_2^{(\varphi)} r^2 + A_1^{(\varphi)} r + A_0^{(\varphi)}, & 0 \leq r \leq a, \\ P_3^{(\varphi b)} = B_3^{(\varphi)} r^3 + B_2^{(\varphi)} r^2 + B_1^{(\varphi)} r + B_0^{(\varphi)}, & a \leq r \leq b. \end{cases}$$

Для определения  $A_i^{(\varphi)}, B_i^{(\varphi)}, i = \overline{0-3}$  будем использовать условия

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=b} = 0, \quad \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} r P_3^{(\varphi a)}(r) dr d\lambda = \overline{\varphi_a}, \quad \frac{1}{\pi(b^2 - a^2)} \int_a^b \int_0^{2\pi} r P_3^{(\varphi b)}(r) dr d\lambda = \overline{\varphi_b},$$

$$P_3^{(\varphi a)}(a) = P_3^{(\varphi b)}(a), \quad \frac{\partial P_3^{(\varphi a)}}{\partial r}(a) = \frac{\partial P_3^{(\varphi b)}}{\partial r}(a), \quad \frac{\partial^2 P_3^{(\varphi a)}}{\partial r^2}(a) = \frac{\partial^2 P_3^{(\varphi b)}}{\partial r^2}(a).$$

Для водности  $Q$  будем полагать

$$Q(r, z, t) = \begin{cases} P_3^{(Qa)} = A_3^{(Q)} r^3 + A_2^{(Q)} r^2 + A_1^{(Q)} r + A_0^{(Q)}, & 0 \leq r \leq a, \\ 0, & a \leq r \leq b. \end{cases}$$

Для определения  $A_i^{(Q)}$ ,  $i = \overline{0-3}$  будем использовать условия

$$\left. \frac{\partial Q}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a \int_0^{2\pi} r P_3^{(Qa)}(r) dr d\lambda = \overline{Q}, \quad Q|_{r=a} = 0, \quad \left. \frac{\partial Q}{\partial r} \right|_{r=a} = 0.$$

В результате получили систему уравнений, содержащую только осреднённые значения искомых параметров. Её развитие в части учёта турбулентного обмена и микрофизических процессов (например, по [7]) принципиальных затруднений не вызывает. Численное её решение, удовлетворяющее современным требованиям, в частности требованию монотонности, может быть получено, например, методами из [8].

Отметим в заключение, что построенная модель облачной конвекции, обладая рядом очевидных изъянов (например, невозможностью учёта сдвига ветра), отличается тем несомненным преимуществом, что, учитывая основные физические закономерности развития внутримассовых конвективных облаков, требует для своей реализации минимально допустимого для ряда прикладных задач времени счёта. В связи с этим такого класса модели могут найти своё применение не только в области активных воздействий, но и при параметризации облачной конвекции в различных схемах прогноза погоды и климата.

### **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. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Федченко Л.М. Математическое моделирование градовых облаков //Труды научно-практической конференции, посвящённой 40-летию начала производственных работ по защите от града. –Нальчик, 2011, С 137–144.
3. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Гаева З.С., Новикова Л.Д., Шаповалов В.А., Машуков И.Х., Шериева М.М. Численное моделирование параметров градовых облаков при воздействии кристаллизующим реагентом//Тр. ГГО –2016. – Выпуск 582. – С. 174–184
4. Бекряев В.И., Гурович М.В. Нестационарная численная модель Сб //Тр. ГГО –1991. – Выпуск 538. – С. 109–121.

5. Веремей Н.Е., Довгальук Ю.А., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С. Описание базовой численной нестационарной трёхмерной модели конвективного облака//Тр. ГГО –2016. – Выпуск 582. – С. 45–91.
6. Довгальук Ю.А., Веремей Н.Е., Синкевич А.А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. ГГО, – Санкт-Петербург. – 2007, – 162 с.
7. Пастушков Р.С. К учёту зарождения и облачных капель и ледяных кристаллов при численном моделировании конвективных облаков и активных воздействий на них льдообразующими аэрозолями. Вопросы физики облаков. Атмосферные аэрозоли, активные воздействия//Сборник статей памяти Н.О. Плауде – М., – 2015, –С. 242–267.
8. 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.
9. Шаповалов В.А. Численное моделирование формирования макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков. Автореферат дис., ВГИ, Нальчик, 2011. – 14 с.
10. Asai T., Kasahara A. A theoretical study of the compensating downward motion associated with cumulus clouds//J. Atmos. Sci., 1967, 24, pp. 487 – 496.
11. Khain A. P. et al. Simulation of effects of atmospheric aerosols on deep turbulent convective clouds using a spectral microphysics mixed-phase cumulus cloud model. Part 1: model description and possible applications//J. Atmos. Sci., 2004, 61, pp. 2963 – 2982.
12. Ogura T., Takahashi T. Numerical simulation of the life cycle of a thunderstorm cell //Mon. Wea. Rev., 1971, 99, pp. 895 – 909.
13. Ogura T., Takahashi T. The development of warm rain in a cumulus model//J. Atmos. Sci., 1973, 30, pp. 262 – 277.
14. Ovchinnikov M., Kogan Y.L. An investigation of ice production mechanisms using a 3D cloud model with detailed microphysics. Part 1: model description//J. Atmos. Sci., 2000, 57, pp. 2989 – 3003.
15. Taylor G.R. Sulfate production and deposition in midlatitude continental cumulus clouds/ Part 1. Cloud model formulation and base run analysis//J. Atmos. Sci., 1989, 46, pp. 1971 – 1990.
16. Yau M.K. Taylor G.R. A two-cylinder model of cumulus cell and its application in computing cumulus transports//J. Atmos. Sci., 1980, 37, pp. 2470 – 2485.

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Белова Л.К., Дрофа А.С.

ФГБУ НПО «Тайфун», г. Обнинск

Одной из основных областей применения трехмерной численной модели конвективного облака является исследование эффекта воздействия на облако гигроскопическими реагентами. Поскольку целью активных воздействий при этом является получение дополнительных осадков, то при разработке тех или иных методов воздействия необходимо иметь достаточно ясное понимание процессов осадкообразования в облаке, чтобы получить наибольший эффект воздействия. В настоящей работе по результатам расчетов на разработанной коллективами НИУ Росгидромета (Довгалюк и др., 2016) трехмерной численной модели конвективного облака проведен анализ процессов осадкообразования в облаке при его естественном развитии и при воздействии на него гигроскопическими реагентами.

В данной модели используется параметрическое описание микрофизических процессов в облаке, где облачные частицы подразделяются на фракции – облачные капли и ледяные частицы, дождевые капли и град (Веремей и др., 2016). Процесс формирования дождевых капель в ансамбле взаимодействующих между собой облачных капель (автоконверсия) описывается формулой Кесслера (Kessler, 1969), где используется два параметра – величина  $K$ , характеризующая интенсивность автоконверсии, и  $Q_{СП}$  – пороговая водность облачных капель, при превышении которой начинает действовать механизм автоконверсии. Эти параметры могут варьироваться в зависимости от физико-географических условий и типа облаков. Для конвективных облаков континентального типа, исследованию которых посвящена настоящая работа, используются следующие величины параметров автоконверсии -  $K = 0,0002$  и  $Q_{СП} = 2,6 \text{ г/м}^3$  (Белова, Дрофа, 2016).

Входными параметрами модели являются стратификация атмосферы и мощность источника перегрева подстилающей поверхности для инициализации конвекции (McNider and Corr, 1990). Для моделирования облаков различной мощности выбирались величины среднего теплового потока с подстилающей поверхности от 100 до 600 Вт/м<sup>2</sup>.

Для моделирования облаков континентального происхождения использовались вертикальные профили температуры и влажности, типичные для неустойчивой стратификации атмосферы. Анализ используемых профилей показал, что моделируемая атмосфера обладает значительным запасом потенциальной энергии неустойчивости и предполагает возможность

образования сильных осадков. Величина *CAPE*, характеризующих степень неустойчивости атмосферы (Doswell and Schultz, 2006), составила достаточно значительную величину 620 Дж/кг, что свидетельствует об атмосферных условиях, благоприятных для развития глубокой конвекции. Введение запирающих температурных слоев на высотах от 4 до 6 км позволило моделировать условия слабой и умеренной неустойчивости атмосферы, при которых реализовались облака с нижней границей 800 м и высотой верхней границы от 4 до 9 км. Параметры, характеризующие эффективность осадкообразования для всех моделируемых облаков при их естественном развитии и при воздействии солевым порошком, приводятся в таблице.

Таблица

**Характеристики осадков из облаков без воздействия (Ф)  
и при воздействии солевым порошком (В).**

Мощность облака Характеристики		3,2 км		4,2 км		5,0 км		8,0 км	
		Ф	В	Ф	В	Ф	В	Ф	В
1	Максимальная водность облачных капель, г/м <sup>3</sup>	2,7	2,4	3,2	2,8	3,6	3,1	4,4	4,3
2	Максимальная водность дождевых капель, г/м <sup>3</sup>	-	0,6	1,6	2,1	1,7	2,6	10,9	11,6
3	Максимальное содержание града, г/м <sup>3</sup>	-	-	-	-	1,3	1,6	11,2	9,3
4	Максимальная интенсивность дождя, мм/час	-	8,8	30,3	45,1	47,0	74,0	320	347
5	Максимальная интенсивность града, мм/час	-	-	-	-	2,0	3,2	149	140
6	Масса выпавшего дождя, тыс.т.	-	1,9	7,3	12,1	18,7	24,2	97,5	102,7
7	Масса выпавшего града, тыс.т.	-	-	-	-	0,1	0,2	12,5	12,0
8	Влагозапас, мм	13	13	18	18	21	21	59	60
9	Водозапас облака, мм	4,2	4,8	8,6	10,4	11,0	12,1	58,5	59,0
10	Доля осадков в облаке, %	2	33	40	52	40	58	99	99
11	Осадки, мм	-	2,0	2,9	6,5	4,0	7,8	38,3	45,9
12	Водозапас / влагозапас	0,32	0,37	0,48	0,57	0,52	0,59	0,99	0,99
13	Осадки / водозапас	-	0,41	0,34	0,62	0,37	0,65	0,65	0,78
14	Осадки / влагозапас	-	0,20	0,16	0,36	0,19	0,38	0,65	0,77

Для прогноза осадков и оценки количества осадков, которые могут выпасть из облаков, обычно используются данные о влагосодержании атмосферы и водозапасе облаков, рассчитываемые по данным аэрологического зондирования или радиометрических измерений со спутников (Шишкин, 1981; Матвеев, 1984). Используя результаты численного моделирования, проанализируем процесс осадкообразования в конвективных облаках при их естественном развитии.

На рис. 1 приводятся результаты расчетов влагосодержания вертикального столба атмосферы и содержания в этом столбе облачных и дождевых капель (в мм слоя осажденной воды), полученных при моделировании конвективного облака мощностью 5 км. Расчеты выполнены для вертикального столба, расположенного в центре моделируемого облака. Влагосодержание вертикального столба атмосферы единичного сечения составляет 41 мм слоя осажденной воды. При формировании конвективного облака влагосодержание внутри облака увеличивается за счет вовлечения в него водяного пара из окружающего пространства. В момент достижения облаком максимальной мощности влагосодержание столба воздуха в облаке достигает максимального значения 62 мм. Т. е. для образования облака мощностью 5 км «израсходовано» водяного пара массой, равной массе осажденного слоя воды толщиной 21 мм. Будем в дальнейшем называть эту величину «влагозапасом облака». В процессе эволюции облака, после выпадения осадков и разрушения облака, влагозапас облака спадает до нуля, а влагосодержание столба атмосферы уменьшается до первоначальных значений.

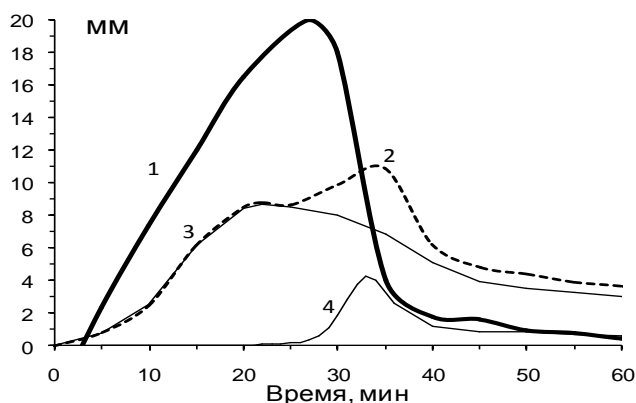


Рис. 1. Временной ход изменения влагосодержания (1), водозапаса (2), содержания облачных (3) и дождевых (4) капель в столбе атмосферы при эволюции облака мощностью 5,0 км.

При формировании облака, вследствие процессов конденсации водяного пара, содержание облачных капель увеличивается до определенного уровня, определяемого динамикой развития облака и его микрофизическими характеристиками. Процесс увеличения массы облачных капель прекращается с началом образования дождевых капель. Суммарная величина содержания облачных и дождевых капель определяет водозапас облака, т.е. — наибольшую массу воды, которая образовалась вследствие конденсации водяного пара в облаке. Как видно из графиков рис. 1, в

процессе формирования осадков не все облачные капли превращаются в дождевые. Максимальное содержание дождевых капель в данном случае оказывается почти в 2 раза меньше, чем содержание облачных капель.

Величина отношения водозапаса облака к его влагозапасу может характеризовать эффективность преобразования водяного пара в облачные и дождевые капли. Параметры, характеризующие эффективность осадкообразования для всех моделируемых облаков приводятся в таблице. Как видно из данных таблицы (строка 12), эффективность преобразования водяного пара в жидкую фазу уменьшается с уменьшением мощности облаков.

Дождь из облака мощностью 5 км достигает поверхности земли на 33-й минуте эволюции облака. С этого момента времени водозапас облака начинает уменьшаться вследствие выпадения дождевых капель из облака. При этом не все дождевые капли достигают поверхности земли – часть из них испаряется. В таблице (строка 13) показана величина отношения количества выпавших на землю осадков к водозапасу облака. Из данных таблицы видно, что, например, из облака мощностью 5 км на землю выпадает лишь 37% дождевых капель, образовавшихся в облаке. Из облака мощностью 3,2 км, водозапас которого составлял 4,2 мм, осадки поверхности земли не достигают.

Полную эффективность осадкообразования в облаках принято характеризовать величиной отношения «осадки/влагозапас», т.е. отношением количества выпавших на землю осадков к количеству водяного пара, поступившего в облако. Как видно из данных таблицы (строка 14) для теплых конвективных облаков эффективность осадкообразования не превышает 20%. Для облака мощностью 3,2 км эффективность осадкообразования равна нулю. Из данных наблюдений в реальных атмосферных условиях следует, что из облаков мощностью менее 3 км осадки не выпадают, а эффективность осадкообразования в теплых конвективных облаках континентального типа не превышает величину 0,3 (Прихотько, 1968; Шишкин, 1981; Мазин, Шметер, 1983; Матвеев, 1984).

Проанализируем процесс осадкообразования в градообразующем облаке мощностью 8 км. В данном облаке облачные частицы существуют в виде четырех фракций – облачные и дождевые капли, ледяные кристаллы и град. Частицы града образуются за счет гетерогенного замерзания облачных и дождевых капель, а также – коагуляции ледяных частиц с жидкими каплями. Интенсивность выпадения града значительно меньше, чем интенсивность дождя, несмотря на то, что содержание градовых частиц в облаке значительно превышало содержание дождевых капель. Это объясняется таянием градовых частиц при выпадении из облака и превращение их в дождевые капли у поверхности земли.

Временной ход изменения влагозапаса облака мощностью 8 км и содержания в вертикальном столбе атмосферы облачных частиц и осадков (в мм слоя осажженной воды) показан на

рис. 2. Как отмечалось выше, влагосодержание столба атмосферы вне облака составляет 41 мм. За счет вовлечения в облако водяного пара влагосодержание столба атмосферы в момент достижения облаком максимальной мощности достигает максимального значения 100 мм. Т.е. влагозапас данного облака составляет 59 мм. Как видно из рис. 2, наибольшее значение содержания всех облачных частиц (т.е. – водозапас облака) составляет 58,5 мм и практически совпадает с влагозапасом облака. Это означает, что в данный момент времени в центральной части облака весь поступивший в облако водяной пар сконденсировался в облачные частицы (жидкие и твердые). При этом водозапас облака практически полностью определяется массой осадков, т.к. масса облачных частиц (капель и кристаллов) более чем в 3 раза меньше. Таким образом, в данном случае наблюдается коренное отличие от процесса образования осадков в теплых облаках, где водозапас облака в основном формируется за счет облачных капель.

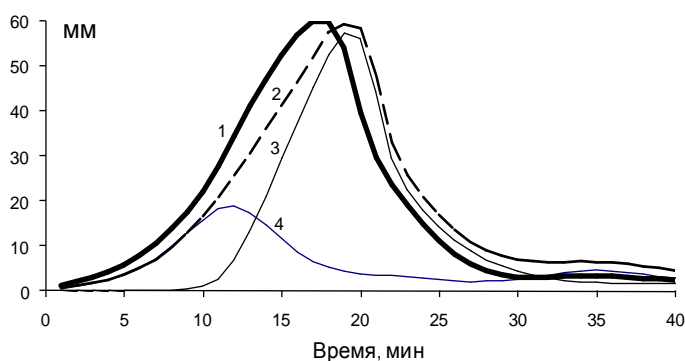


Рис. 2. Временной ход изменения влагосаза (1), водозаза (2), содержания частиц осадков (3) и облачных частиц (4) в столбе атмосферы при эволюции облака мощностью 8,0 км.

Эффективность преобразования водяного пара в жидкую и твердую фазу в градообразующем облаке более, чем в 2 раза выше, чем в теплых облаках (см. таблицу, строка 12) и достигает 99%. Т.е. практически весь поступивший в центральную часть облака водяной пар преобразовался в облачные частицы, причем основная часть водяного пара израсходована на образование твердых ледяных частиц. Объясняется это, очевидно, значительно большей конденсационной активностью ледяных частиц по сравнению с жидкими каплями. Из таблицы (строка 13) также видно, что в градообразующих облаках относительное количество осадков, выпавших из облака и достигших поверхности земли, значительно выше. Так в градовых облаках земли достигает 65% осадков, а в теплых облаках – не более 40%. Вследствие вышеуказанных причин полная эффективность осадкообразования в градовом облаке оказывается значительно выше, чем в теплых облаках. Так в градовом облаке эффективность осадкообразования достигает 65%, в то время как в теплых конвективных облаках не превышает 20%.

Численное моделирование воздействия на конвективное облако гигроскопическим реагентом с использованием трехмерной численной модели проведено в работе (Белова, Дрофа, 2016),



где исследуется эффективность воздействия гигроскопическими частицами полидисперсного солевого порошка, способ изготовления которого разработан в ФГБУ «НПО «Тайфун» (Дрофа и др., 2013). В этой работе представлена методика использования трехмерной модели для исследования воздействия гигроскопическими частицами и приводятся результаты расчета интенсивности осадков и общего их количества при различных режимах ввода солевого порошка в облако в различных атмосферных условиях. Моделирование воздействия 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. Величина порога автоконверсии при использовании данного реагента равна  $Q_{СП} = 2,2 \text{ г/м}^3$ , а интенсивность автоконверсии  $K = 0,00038 + 0,156G$  определяется массовой концентрацией вводимого солевого порошка  $G \text{ (мг/м}^3\text{)}$ . Воздействие солевым порошком на конвективное облако предполагает введение реагента в подоблачный слой облака в центре его основания.

Сводные результаты моделирования воздействия солевым порошком общей массой 24 кг на облака различной мощности приведены в таблице. Как показывает анализ процессов осадкообразования, при вводе солевого порошка в облако преобразование облачных капель в дождевые наступает раньше, чем при естественном развитии облака. Вследствие этого содержание облачных капель в подвергнутом воздействию облаке оказывается меньше. Водозапас облака при воздействии изменяется незначительно. Изменяется только соотношение облачных и дождевых капель в водозапасе облака в сторону увеличения последних.

Как видно из данных таблицы, при воздействии увеличивается эффективность преобразования водяного пара в жидкокапельную фазу облака (строка 12). При воздействии также уменьшаются потери дождевых капель за счет испарения во время их выпадения из облака до поверхности земли (строка 13). В целом же общая эффективность осадкообразования при воздействии оказывается значительно выше, чем при естественном развитии облака. Так, если для фонового облака мощностью 5 км общая эффективность осадкообразования (величина отношения «осадки/ водозапас» – строка 14) равна 19%, то при воздействии она в 2 раза выше. Для облака мощностью 4,2 км воздействие солевым порошком повышает эффективность осадкообразования с 16% до 36%. При воздействии на облако мощностью 3,2 км, из которого при естественном развитии осадки не выпадают, эффективность осадкообразования достигает 20%. Воздействие солевым порошком на градообразующее облако мощностью 8 км приводит к повышению эффективности осадкообразования от 65% до 77%.

Использование трехмерной модели для анализа осадкообразования облаков позволило установить ряд закономерностей, существенно определяющих эффективность воздействия гигроскопическими реагентами.

Так результаты численного моделирования показывают, что для получения максимального эффекта воздействия введение гигроскопических частиц в облако необходимо осуществлять в определенный момент времени на начальной стадии развития облака. Объясняется это тем, что при более позднем вводе реагента дождевые капли образуются из фоновых облачных капель, и процесс осадкообразования в облаке будет определяться его естественным развитием. При более раннем вводе реагента в облако преобразование облачных капель в дождевые начинается, когда водозапас облака еще не достиг своего максимального значения. Вследствие этого выпадение осадков из облака начинается раньше и количество выпадающих из него дополнительных осадков оказывается меньше. В связи с тем, что облака большой мощности развиваются при более сильных вертикальных воздушных потоках, в работе (Белова, Дрофа, 2016) предложен следующий практический критерий определения оптимального режима ввода реагента в облако – время, когда облако достигает мощности 2–3 км. Для всех облаков такая мощность облака приходится на начальную стадию их развития и реализуется в приблизительно необходимое оптимальное время для ввода реагента.

По результатам численного моделирования также установлено, что при увеличении расхода солевого порошка количество дополнительных осадков возрастает только до определенного предела. Это объясняется тем, что формирование осадков при воздействии происходит раньше, чем при его естественном развитии. Это приводит к уменьшению содержания облачных частиц, что, в свою очередь, приводит к снижению интенсивности образования осадков. Поэтому при большом количестве вводимого реагента, когда содержание облачных частиц уменьшается, интенсивность образования осадков также уменьшается. Вследствие этого количество дополнительных осадков стабилизируется на определенном уровне.

Как свидетельствуют приведенные в таблице данные, использование метода воздействия гигроскопическими реагентами дает реальную возможность получения значительного количества дополнительных осадков из конвективных облаков. При оптимальной технологии проведения работ по воздействию на облака мощностью более 4 км может быть дополнительно получено около 5 тыс. тонн воды. При воздействии на облака меньшей мощности (более 3 км), из которых при их естественном развитии осадки не выпадают, также может быть получено значимое количество дополнительных осадков. При этом эффективность воздействия наибольшая для облаков мощностью 4–5 км, из которых при их естественном развитии выпадает относительно небольшое количество осадков. Из таких облаков может быть получено дополнительно 30-60% осадков. Воздействие на облака большей мощности, в том числе – на градообразующие, позволяет получить около 5% дополнительных осадков.

### *Список литературы*

1. Белова М. В., Дрофа А.С. (2016). Исследование воздействия гигроскопическими реагентами на конвективное облако по результатам численного моделирования //Труды ГГО. 2016. Вып. 582. С 184–201.
2. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М. А. и др. (2016). Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака//Труды ГГО. С-Петербург. Вып.582. С.45-91.
3. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А. и др. (2016). Концепция разработки численной нестационарной трехмерной модели эволюции осадкообразующего конвективного облака в естественных условиях и при активных воздействиях//Труды ГГО. С-Петербург. Вып.582. С.7-44.
4. Дрофа А. С. (2010). Исследование воздействия гигроскопическими частицами на теплое конвективное облако по результатам численного моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т.46. № 3. С. 348-362.
5. Дрофа А.С., Ераньков В.Г., Иванов В.Н., Шилин А.Г., Яскевич Г.Ф. (2013). Экспериментальные исследования эффективности воздействия солевыми порошками на конвективное облако для увеличения осадков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т.49. №3. С.327-335.
6. Мазин И. П., Шметер С. М. Облака. Строение и физика образования Л.. Гидрометеиздат. 1983. 280 с.
7. Матвеев Л. Т. (1984). Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. - Л.: Гидрометиздат. 752с.
8. Прихотько Г. Ф. Искусственные осадки из конвективных облаков - Л.: Гидрометиздат. 1968. 174 с.
9. Шишкин Н. С. (1981). К расчету водозапаса конвективных облаков над большими территориями // Труды ГГО. Вып. 439. С. 11—16.
10. Doswell C.A., Shultz D.M. (2006) On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. - Electronic J. Severe Storms Meteorol. V. 1. № 3. P. 1-22.
11. Kessler E. (1969). On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation // Meteorological Monographs. V.10. №32. American Meteorological Society. Boston. P.84.
12. McNider, R. T., and Kopp F.E. (1990). Specification of the scale and magnitude of thermals used to initiate convection in cloud models. // J. Appl. Meteor.. V. 29. P. 99–104.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЛАКА С ОКРУЖАЮЩЕЙ АТМОСФЕРОЙ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ашабоков Б.А.<sup>1</sup>, Шаповалов А.В.<sup>1</sup>, Гучаева З.Х.<sup>1</sup>, Увижева Ф.Х.<sup>2</sup>,  
Шаповалов В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик,

<sup>2</sup> Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН,  
г. Нальчик

Конвективные облака относятся к сложным атмосферным явлениям, основными особенностями которых являются нестационарность, нелинейность, трехмерность и разномасштабность протекающих в них процессов. Другой не менее важной их особенностью, играющей важнейшую роль в формировании их макро- и микроструктурных характеристик является наличие взаимодействия между облачными процессами и между облаками и окружающей их атмосферой (эмерджентность), которые носят чрезвычайно сложный и неоднозначный характер. Отметим, что роль отмеченных факторов в формировании облаков и осадков до настоящего времени практически не исследована [3-13]. Из работ, посвященных этому вопросу, можно отметить работу [2], в которой исследована роль деформации полей термодинамических параметров в конвективных облаках в формировании их микроструктурных характеристик. Как известно, она является результатом взаимодействия динамических, термодинамических и микрофизических процессов в облаках. Показано, что роль данного фактора в формировании микроструктуры конвективных облаков и, соответственно, в процессах осадкообразования значительна. К таким работам можно отнести и работу [14], в которой исследовано влияние излучения на микрофизические процессы и турбулентность в слоистых облаках. Следующим этапом развития физики облаков, по нашему мнению, должно быть исследование роли данного фактора в формировании их макро- и микроструктурных характеристик.

Ниже излагаются результаты расчетов по исследованию влияния распределения ветра в атмосфере на образование и развитие конвективных облаков. Отметим, что оно является одним из механизмов влияния атмосферы на процессы облакообразования. Расчеты проводились на основе трехмерной нестационарной модели градовых облаков в прямоугольной пространственной области 60x60x16 км [1]. Развитие облака инициировалось заданием теплового импульса вблизи поверхности земли со следующими параметрами: координаты центра импульса в расчетной области (м) - (22000; 22000; 2500), размеры импульса по трем осям координат (м) – (1500; 1500; 2000), перегрев  $\Delta T = 1$  °С.

Остановимся сначала на результатах расчетов развития облака с использованием данных аэрологического зондирования атмосферы за 07.06.2012 (пункт аэрологического зондирования атмосферы - аэропорт Минеральные Воды). Условия в этот день были благоприятными для развития интенсивного многоячейкового градового процесса. По радиолокационным данным Северо-Кавказской военизированной службы (г. Нальчик) в этот день по КБР и Ставропольскому краю прошли градовые процессы, отмечалось выпадение града на землю ( $d=1,5-4$  см).

На рис.1-2 приведены результаты расчетов параметров облака на 20-й минуте его развития. Представлены изоповерхность скорости вертикальных потоков  $W=10$  м/с, изолинии водности и ледности в вертикальной плоскости, проходящей через центр облака параллельно оси ОХ. Справа на рисунках приведено распределение по вертикали горизонтального ветра в атмосфере. Стрелки указывают направление ветра, а их длина пропорциональна его скорости. Можно заметить, что изменение ветра по направлению и величине носит достаточно сложный характер. Считалась и радиолокационная структура облака на длине волны 10 см., но результаты не приводятся.

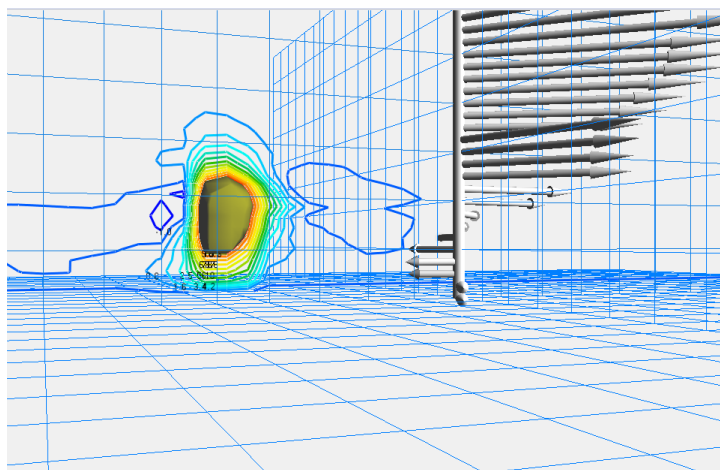


Рис. 1. Восходящие и нисходящие потоки и горизонтальный ветер по зонду в трехмерной области. Изоповерхность  $W_{в}=10$  м/с.

Максимальные значения параметров облака на 20-й минуте следующие: скорости нисходящих и восходящих потоков  $W_{н} = -1,86$  м/с и  $W_{в} = 17,3$  м/с, ( $z=4000$  м); водности  $5,78$  г/м<sup>3</sup>, ( $z=4500$  м); ледности  $5 \cdot 10^{-4}$  г/м<sup>3</sup>, ( $z=5500$  м). В скобках указана высота, на которой параметр принимает данное значение.

Изолинии, соответствующие различным значениям скорости восходящих и нисходящих потоков, и изоповерхность  $W=10$  м/с приведены на рис.1. Можно заметить, что структура воздушных потоков внутри облака и вокруг него носит достаточно сложный характер, при этом восходящие потоки более упорядочены, чем нисходящие потоки в обширной области вокруг зоны восходящих потоков.

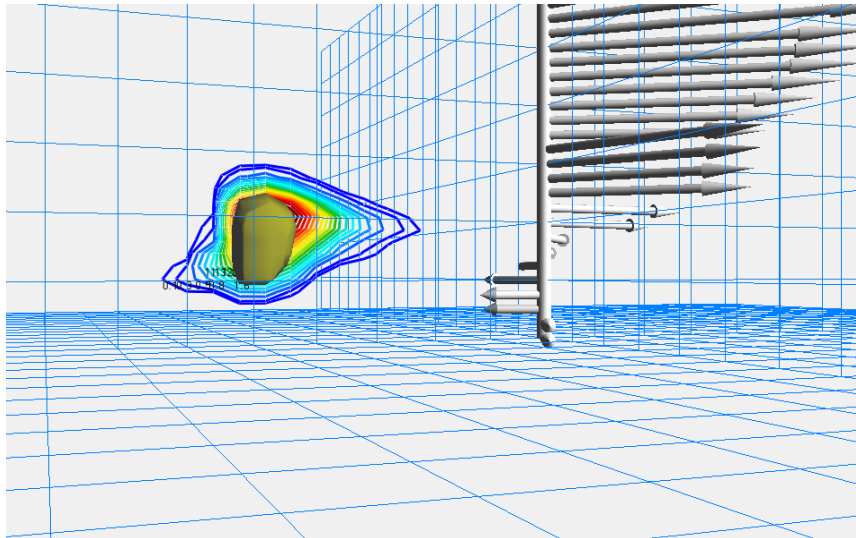


Рис. 2. Изолинии водности. Изоповерхность  $W=10$  м/с.

Как можно заметить на рис. 2, изолинии водности в облаке локализируются в зоне восходящих потоков, что согласуется с теорией формирования жидкокапельной фракции в облаке. Можно еще заметить, что на форму области локализации капель в облаке, значительное влияние оказывает распределение по высоте ветра в атмосфере. Максимальное значение водности составляет около  $6 \text{ г/м}^3$ . Область формирования кристаллов расположена в верхней части изоповерхности  $W_{\text{в}}=10$  м/с. По результатам расчетов, в силу малой концентрации и незначительных размеров кристаллов в рассматриваемый момент времени, радиолокационная структура облака формируется преимущественно жидкокапельной фракцией.

Такие же картины были получены для 30 мин. развития облака. Максимальные значения параметров облака следующие: скорости нисходящих и восходящих потоков  $W_{\text{н}} = -1,91 \text{ м/с}$  и  $W_{\text{в}} = +13,7 \text{ м/с}$ , ( $z=4500$  м); водности  $3,43 \text{ г/м}^3$ , ( $z=3000$  м); ледности  $6,15 \text{ г/м}^3$ , ( $z=4500$  ).

Можно заметить некоторое уменьшение максимального значения скорости нисходящих потоков и такое же увеличение (на  $2,7$  м/с) скорости восходящих потоков по сравнению с их значениями на 20 мин. развития облака. Зона восходящих потоков при этом приняла форму, типичную для градовых процессов. По сравнению с предыдущим моментом времени максимум водности в облаке заметно уменьшился – больше чем на  $4 \text{ г/м}^3$ , а максимальное значение ледности, наоборот увеличилось, примерно, на  $2 \text{ г/м}^3$ . Максимум водности оказался в нижней половине зоны восходящих потоков, а область локализации ледяных частиц в облаке снизилась на  $2000$  м. Она располагается над областью локализации капель и правее зоны восходящих потоков. Имеет место интенсивное поглощение переохлажденных капель ледяными частицами, с чем может быть связано уменьшение водности в облаке.

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

Остановимся на некоторых результатах расчетов, которые были проведены для исследования влияния изменения распределения горизонтального ветра с высотой на характеристики облака. При проведении второго варианта (второй серии) расчетов все параметры атмосферы, использованные в предыдущем варианте, оставались неизменными, а для горизонтального ветра было принято условие, что он имеет одно и то же направление на всех высотах в атмосфере - вдоль оси ОХ, т.е. на восток (идеализированный случай). Во втором варианте (серии) были получены следующие максимальные значения параметров облака на 20-й минуте развития: скорости нисходящих и восходящих потоков  $W_n = -1,780$  м/с и  $W_b = 15,2$  м/с, ( $z=4000$  м); водности  $5,48$  г/м<sup>3</sup>, ( $z=4500$  м); ледности  $3 \cdot 10^{-4}$  г/м<sup>3</sup>, ( $z=5500$  м); отражаемость на 10 см  $17,5$  dBZ, ( $z=4500$  м).

Сравнение этих значений параметров с соответствующими их значениями в предыдущем варианте в этот же момент времени, показывает, что имеет место некоторое уменьшение максимальных значений всех параметров. Кроме этого, во втором варианте появился наклон изоповерхности  $W=10$  м/с к горизонтальной плоскости. Имеет также место некоторое расширение области восходящих потоков, а область нисходящих потоков изменилась незначительно.

Наблюдается некоторое расширение объема зоны локализации капель. Но ее положение относительно изоповерхности  $W=10$  м/с осталось без изменений. По результатам расчетов, радиолокационная структура облака не претерпела заметных изменений. Сравнение параметров облака в двух экспериментах указывает на значительную роль распределения по высоте горизонтального ветра в атмосфере в формировании макро- и микроструктуры облака.

Максимумы параметров облака на 20-й минуте оказались равными: скорости нисходящих и восходящих потоков  $W_n = -1,8$  м/с и  $W_b = 17,1$  м/с, ( $z=5000$  м); водности  $9,02$  г/м<sup>3</sup>, ( $z=4500$  м); ледности  $4,63$  г/м<sup>3</sup>, ( $z=6500$  м). Более заметно увеличились максимальные значения водности и ледности в облаке.

На рис. 3-5 приведены результаты расчетов облака на 30-й минуте развития. Значения параметров следующие:  $W -2,4 +16,4$  м/с, ( $z=5000$  м); водность  $9,95$  г/м<sup>3</sup>, ( $z=3500$  м); ледность  $3,80$  г/м<sup>3</sup>, ( $z=6000$  м); отражаемость на 10 см  $66,2$  dBZ, ( $z=3500$  м). Сравнение этих параметров облака с параметрами облака в предыдущем варианте расчетов показывает, что имеет место заметное увеличение максимального значения скорости как восходящих, так и нисходящих

потоков. Существенным образом увеличилось и значение максимальной водности в облаке – почти на  $6 \text{ г/м}^3$ , а что касается значения максимальной ледности, то его значение уменьшилось – примерно на  $2 \text{ г/м}^3$ .

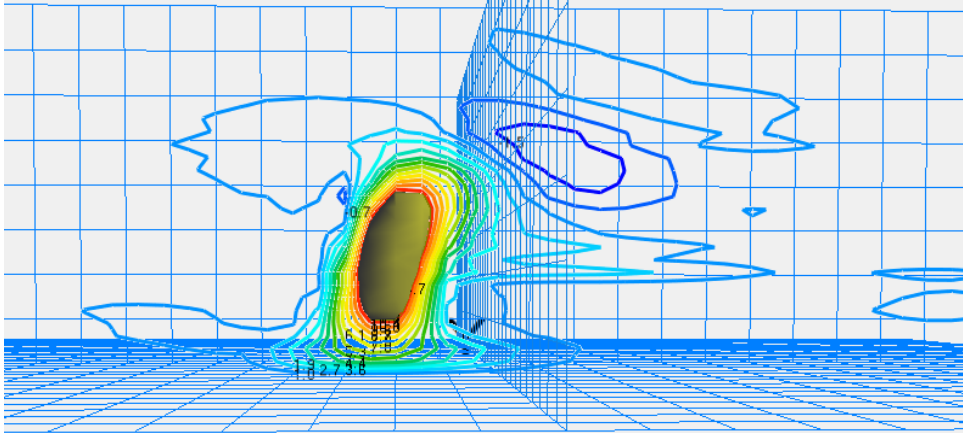


Рис. 3. Восходящие и нисходящие потоки Изоповерхность  $W=10 \text{ м/с}$ .

Что касается области локализации капель в облаке, то ее положение относительно изоповерхности  $W=10 \text{ м/с}$  с течением времени практически не изменилось. Она располагается в нижней половине области восходящих потоков. Но, как было отмечено, произошло увеличение максимального значения водности. Судя по полученным результатам, рост кристаллов происходит за счет капель, которые поступают в зону их локализации посредством переноса восходящими потоками. А образование и рост капель происходит ниже - в нижней части зоны восходящих потоков. Анализ результатов показывает, что по сравнению с первым вариантом расчетов (при наличии поворота ветра в атмосфере) структура области локализации кристаллов стала заметно сложнее.

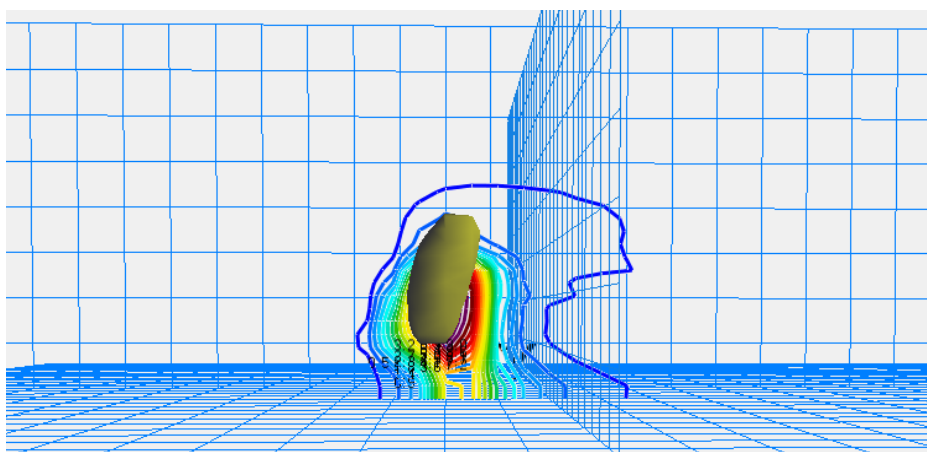


Рис. 4. Изолинии водности. Изоповерхность  $W=10 \text{ м/с}$ .



Положение максимального значения данной характеристики относительно изоповерхности  $W=10$  м/с практически не изменилось. Но объем зоны локализации кристаллов увеличился, с чем может быть связано отмеченное выше уменьшение ледности в облаке.

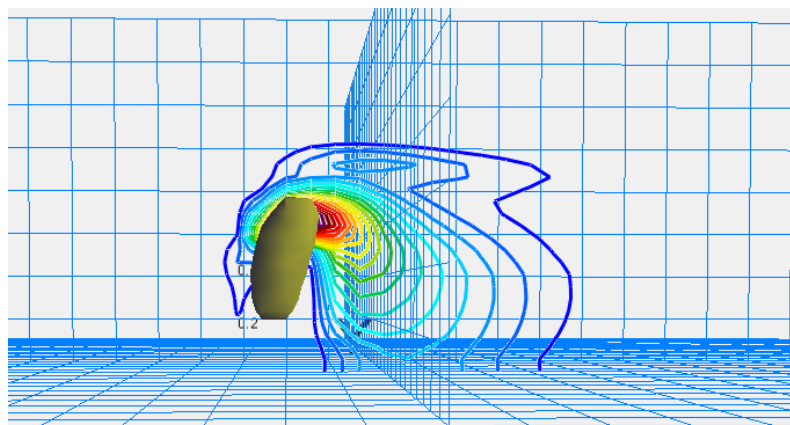


Рис. 5. Изолинии ледности. Изоповерхность  $W=10$  м/с.

Что касается зоны локализации кристаллов, то во втором варианте расчетов ее структура оказалась более сложной, чем в первом. Судя по полученным результатам, рост кристаллов происходит за счет капельной фракции. На рисунках также видно, что положение максимума ледности относительно изоповерхности  $W=10$  м/с различно для рассматриваемых вариантов распределения горизонтального ветра по высоте, различны также объемы зоны локализации кристаллов и, особенно, формы этих зон.

С учетом увеличения водности при отсутствии поворота ветра в атмосфере, можно предположить, что в этом случае количество осадков и их интенсивность увеличатся, а градины достигнут больших размеров. Об этом может свидетельствовать и характер изменения радиолокационной отражаемости: при отсутствии поворота ветра максимальное значение данного параметра больше, чем при его наличии.

В заключение отметим, что по результатам исследований характеристики ветра в атмосфере оказывают заметное влияние на процессы облакообразования. Результаты расчетов характеристик облака с поворотом горизонтального ветра с высотой и без такового в одной и той же синоптической ситуации показали, что имело место усиление параметров облака при отсутствии поворота ветра, причем, это усиление становится заметным после начала выпадения осадков. Это можно объяснить тем, что поворот горизонтального ветра в атмосфере разносит в пространстве зоны восходящих потоков и выпадения осадков, при отсутствии такого поворота эти зоны оказываются в одной вертикальной плоскости, что приводит к усилению восходящих движений воздуха в облаке и, тем самым, к интенсификации процессов облако- и осадкообразования. Результаты моделирования на основе трехмерной модели с детальным учетом гидротермодинамических, микрофизических

и электрических процессов показывают, что процессы в конвективных облаках оказывают взаимное влияние друг на друга, т.е., имеет место взаимодействие различных физических процессов. Взаимодействие процессов, важной особенностью которого является нелинейность, носит весьма сложный характер и играет важную роль в формировании микроструктурных параметров облаков. В частности, динамические процессы оказывают значительное влияние на формирование полей термодинамических параметров в облаке, которые, в свою очередь, определяют ход микрофизических процессов и характер роста частиц осадков (рис.6).

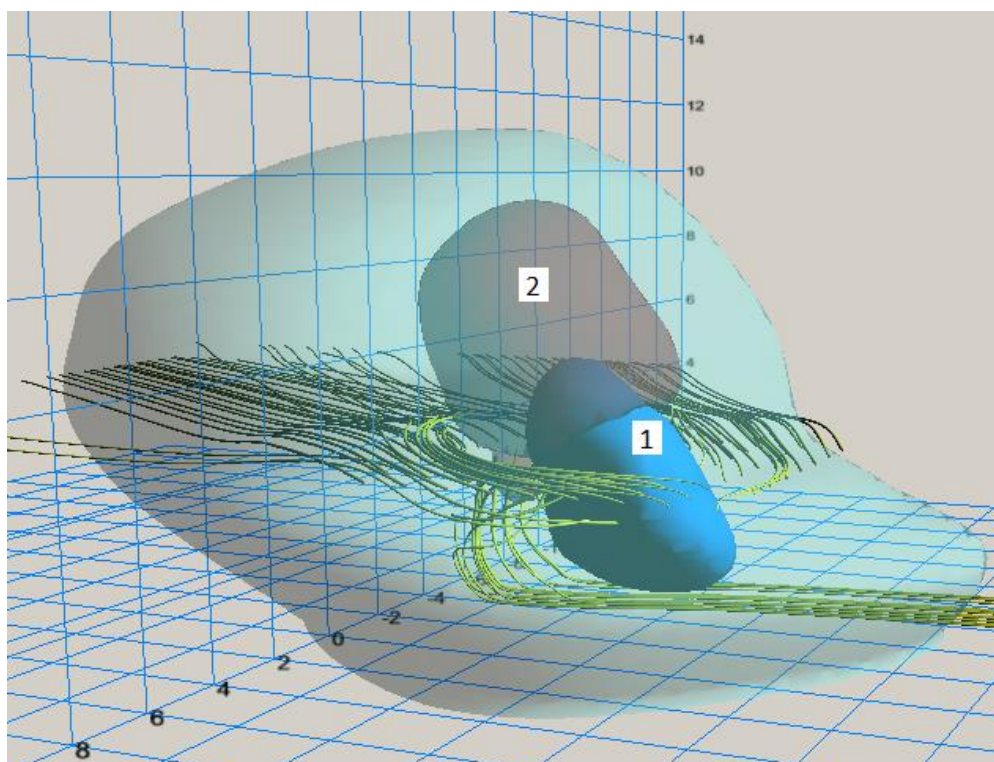


Рис.6. Область сосредоточения капельной фракции (1) и область формирования крупных ледяных частиц (2), полупрозрачная приведена изоповерхность отражаемости 10 dBZ на 30 минуте развития облака. Высота облака – 11 км, максимальная отражаемость 62 dBZ. Для текущего распределения воздушных потоков в облаке изображены линии тока.

Необходимость изучения взаимодействия процессов в конвективных облаках связана с их важной ролью в процессе облако- и осадкообразования. Следует подчеркнуть, что единственным инструментом изучения облачных процессов, с учетом их взаимодействия является математическое моделирование. Другими методами изучить эти процессы не представляется возможным. Результаты численных экспериментов подтверждают, что динамические процессы и взаимодействие с окружающей атмосферой существенно влияют на формирование полей термодинамических параметров в облаке, которые также определяют ход микрофизических процессов и характер роста частиц осадков

### *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., 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. Бекряев В. И., Гурович М. В., 1991, Нестационарная численная модель Сб // Труды ГГО. - Вып. 538. – С. 109-121.
4. Довгалюк Ю.А. и др. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I. Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока // Труды ГГО. Вып. 558, 2008. С. 102—142.
5. Довгалюк Ю.А. и др. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II. Микрофизический блок модели // Труды ГГО, 2010. Вып.562.- С.7—39.
6. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. Численное моделирование облаков. -М.: Гидрометеиздат,1984.- 186 с.
7. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В.И. Полежаев, А.В. Бунэ, Н.А. Везезуб и др. – М.: Наука. 1987. 271 с.
8. Berry E.X., Reinhard R.L. An analysis of cloud drop growth by collection. Part I. Double distributions // J.Atmos.Sci., 1974. V.31, №7 - P.1825-1831.
9. Clark T. Numerical Simulation with a Tree-Dimension Cloud Model: lateral Boundary Condition Experiments and Multicellular Severe Storm Simulations // J.Atmos. Sci, 1979, V.36, № 11. – P. 2191-2215.
10. Cotton W. R., Stephens M. A., Neuhoff T., Tripoli G. J. The Colorado State University three-dimensional cloud model – 1982. Part II: An ice phase parameterization. J. Rech. Atmos., 16, 295–320.
11. Farley R.B. Numerical Modeling of Hailstone Growth/ Part III: Simulation of an Alberta Hailstorm – Natural Seeded Cases // J. Claim. Appl. Met., 1987, V.26, № 7. - P. 789-812
12. Orville R.D., Kopp F.J. Numerical simulation of the life history of a hailstorm // J. Atmos. Sci., 1977. V.34, №10. – P.1596-1618.
13. Straka J.M. Cloud and precipitation microphysics. Principles and Parameterizations.- Cambridge University Press, 2009.- 392 P.
14. Yu Gu, K. N. Liou Interactions of Radiation, Microphysics, and Turbulence in the Evolution of Cirrus Clouds // J. Atmos. Sci. 2000. 57, 2463-2479.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ

**Кулиев Д.Д., Шаповалов А.В.**

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Экспериментальные исследования электричества грозовых облаков затруднительны по ряду причин. В решении вопросов формирования облачных зарядов и поля все большую роль играет численное моделирование, которое является важной составной частью исследований, а иногда и единственно доступным источником научной информации о процессах, происходящих в облаках. Данная работа посвящена исследованию образования электрического заряда и электрического поля в кучево-дождевых облаках на основе математического моделирования.

В моделях [1,3] с детальной микрофизикой учитывался физический процесс разделения зарядов на стадии формирования осадков – это зарядение переохлажденных капель при их замерзании (знак заряда «минус») с образованием осколков замерзания (микровыбросов), заряженных положительно.

Вместе с тем, механизм передачи заряда при столкновениях частиц облачного льда (кристаллов) с крупными ледяными частицами (крупа, град) также считается одним из основных. Столкновительный механизм электризации начинает играть важную роль, когда облачные частицы, в процессе эволюции облака, достигнут размеров, при которых становятся возможными процессы коагуляции.

Лабораторные исследования электризации ледяных частиц и натурные исследования грозовых облаков показали, что столкновения ледяных кристаллов с крупными ледяными частицами (крупа, град) дают большой заряд, передаваемый при единичном взаимодействии, который равен  $10^{-15} - 10^{-13}$  Кл, а при множественных столкновениях заряд крупной ледяной частицы может достигать  $10^{-13} - 10^{-12}$  Кл.

В данной работе исследования выполнялись на основе двумерной и трехмерной модели конвективного облака с детальным описанием термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Модель позволяет рассчитывать плотности объемных зарядов в облаке, потенциал и напряженность электрического поля, создаваемого этими зарядами, учитывается влияние электрического поля облака на микрофизические процессы взаимодействия облачных частиц (электрическая коагуляция).

Микрофизический блок описывает процессы нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы

тяжести, их перенос воздушными потоками, а также взаимодействие облачных частиц под влиянием электрического поля облака. Система уравнений для функций распределения по массам капель  $f_1(\vec{r}, m, t)$ , ледяных частиц  $f_2(\vec{r}, m, t)$  и положительно заряженных мелких ледяных частиц  $f_3(\vec{r}, m, t)$  имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} &= \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{КД} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{КГ} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{АК} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{ДР} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_1 + I_1, \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} &= \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{АК} + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_2 + I_2 + I_{AB}, \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} + u \frac{\partial f_3}{\partial x} + (w - V_2) \frac{\partial f_3}{\partial z} &= \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3 + \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{АК} + \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{AG} + \Delta' f_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V_1(m)$ ,  $V_2(m)$  - установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц;  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{КД}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{КГ}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{АК}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{ДР}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3$  - изменения функции распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно;  $\left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C$ ,  $\left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{АК}$ ,  $\left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3$  - изменения функции распределения кристаллов за счет сублимации, аккреции и замерзания капель;  $\left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3$  - изменения функции распределения  $f_3(\vec{r}, m, t)$  за счет образования осколков при спонтанном замерзании облачных капель,  $\left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{АК}$  изменения функции распределения  $f_3(\vec{r}, m, t)$  за счет аккреции,  $\left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{AG}$  - изменение за счет столкновений ледяных частиц.

Для системы уравнений (1) используются следующие начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} f_1(\vec{r}, m, 0) &= f_2(\vec{r}, m, 0) = f_3(\vec{r}, m, 0) = 0, \\ f_1(\vec{r}, m, t) &= f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } x=0, L_x, \\ f_1(\vec{r}, m, t) &= f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } z=L_z, \\ \frac{\partial f_1}{\partial z} &= \frac{\partial f_2}{\partial z} = \frac{\partial f_3}{\partial z} = 0 \text{ при } z=0. \end{aligned} \quad (2)$$

Образование осколков при замерзании капель учитывается следующим образом:

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

где  $n(m, m')$  - число ледяных осколков массы  $m$ , образующихся при замерзании капель массы  $m'$ ,  
 $R(x, z, m', t)$  – вероятность замерзания капель массой  $m'$  в единицу времени.

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

$$\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{AK} = \int_m^\infty n(m, m') R_2(\vec{r}, m', t) dm' \quad (4)$$

где  $R_2(\vec{r}, m', t) = f_1(\vec{r}, m', t) \cdot \int_0^\infty \beta_2(m', \xi) f_2(\vec{r}, \xi, t) d\xi$  - число столкновений кристаллов массой  $\xi$  с каплями массой  $m'$ , приводящих к замерзанию последних и образованию осколков.

Количество столкновений ледяных частиц описывается выражением:

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{AG} = -f_2(\vec{r}, m, t) \int_0^\infty \beta_2(m, m') \cdot f_2(\vec{r}, m', t) dm' + \int_0^m \beta_2(m, m - m') f_2(\vec{r}, m - m', t) f_2(\vec{r}, m', t) dm' \quad (5)$$

где  $\beta_2(m, m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_2(m) - V_2(m')| \cdot E_2(m, m')$ ,

$E_2$  – коэффициент столкновений кри - .

Остальные выражения для слагаемых, входящих в уравнения (1), представлены в работах [1-4].

На основе разработанной модели проведены численные эксперименты по исследованию роли отмеченных выше механизмов электризации облачных частиц в формировании электрических характеристик грозных облаков.

Ниже приведены результаты исследования формирования микрофизических и электрических характеристик конвективных облаков.

При расчете электрических параметров облака принято условие, что формирование и накопление электрических зарядов в облаке происходит в результате замерзания капель и процесса аккреции (взаимодействия капель и кристаллов). Вследствие разности скоростей падения в воздухе микроосколков, заряжающихся преимущественно положительно, и более крупных частиц, крупы или града, заряжающихся преимущественно отрицательно, происходит пространственное разделение зарядов. В предвершинной части облака преобладает положительный объемный заряд, ниже – отрицательный. В работе представлено электрическое строение конвективного облака на стадии максимального развития (рис. 1-3). Положительный заряд в единице объема на 35-й минуте достигает значения  $+1.89 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>, отрицательный  $-1.42 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>.

Пространственное распределение суммарного объемного заряда в облаке на 35-й минуте эволюции приведено на рис. 1.

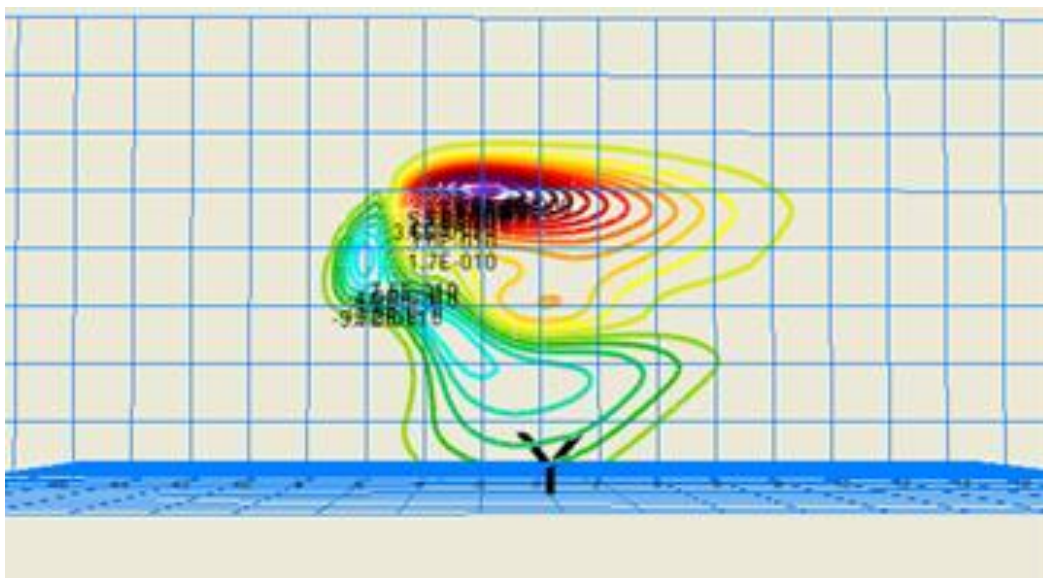


Рис. 1. Распределение объемных зарядов в облаке на 35-й минуте развития, Кл/м<sup>3</sup>.

С помощью разработанных алгоритмов рассчитывались вертикальная  $E_z$  и горизонтальные  $E_x$ ,  $E_y$  составляющие напряженности электрического поля. На 35-й минуте развития облака потенциал электрического поля составляет порядка  $2,8 \cdot 10^9$  В (рис.2). Компоненты напряженности поля имеют значения  $E_x \approx 1500$  В/см, а  $E_z \approx 2000$  В/см (рис.3). С течением времени заряд в облаке, и, соответственно потенциал поля увеличиваются, достигая уровня, при которых происходят внутриоблачные разряды и молнии. Максимальные значения потенциала электрического поля, полученные в расчетах, согласуются с результатами расчетов других авторов.





уходит на рост частиц до диаметра приблизительно 100 мкм. Это связано с тем, что коэффициент взаимодействия мелких частиц очень маленький. По различным данным он составляет от 0,001 до 0,01. Но при наличии значительного электрического поля и зарядов на частицах этот коэффициент возрастает, и может на порядок и более превышать 1,0.

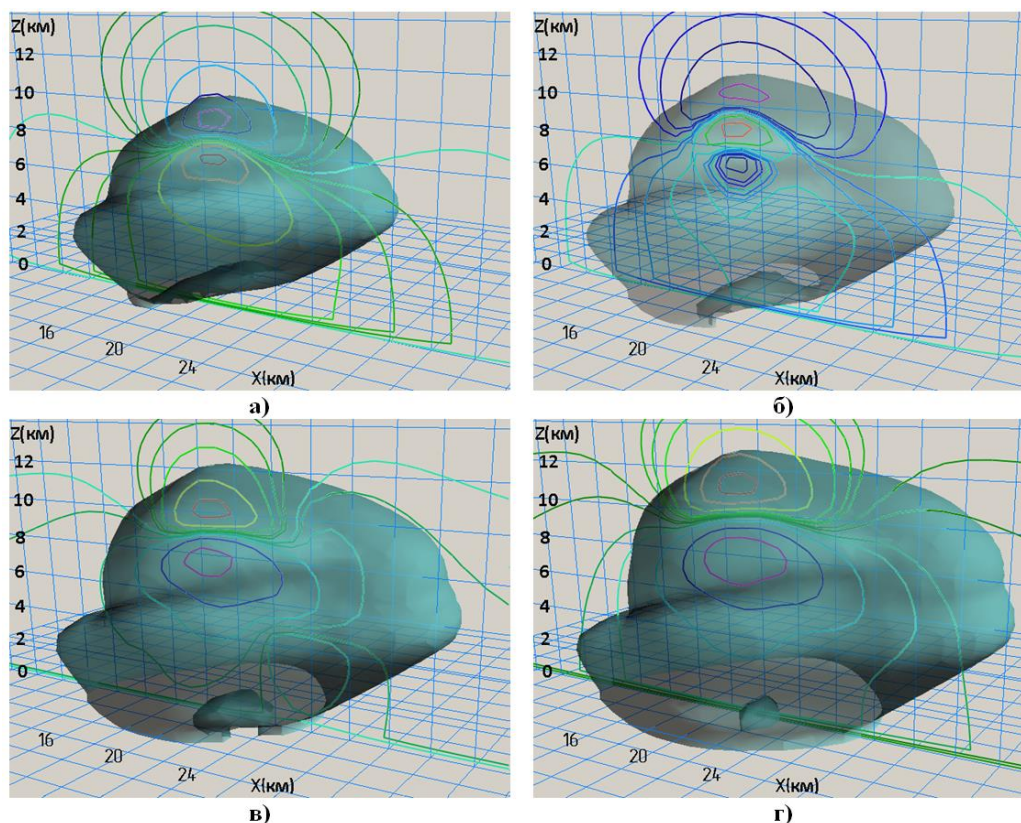


Рис. 4. Изолинии вертикальной составляющей напряженности поля в вертикальной плоскости, проходящей через облако, на фоне изоповерхности радиолокационной отражаемости  $Z=10$  дБZ, в моменты времени а)  $t=30$  мин б)  $t=33,5$  мин в)  $t=37$  мин г)  $t=40,5$  мин. Изолинии вертикальной составляющей напряженности поля: -2000, -1500, -1000, -500, -200, -100, -50, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 В/см.

## Выводы

В работе исследовано формирование положительного и отрицательного объемных электрических зарядов в различные моменты времени. Рассчитаны характеристики электростатического поля конвективного облака. Расчетные значения напряженности электростатического поля применены в модели для корректировки коэффициента коагуляции облачных частиц. За счет электрической коагуляции коэффициент слияния частиц в мощном конвективном облаке возрастает, время роста частиц осадков при этом уменьшается.

Результаты численных экспериментов показали, что существует положительная обратная связь между ростом частиц осадков в облаке и увеличением напряженности электростатического поля. Получено, что электрическое поле с напряженностью более 50-100 В/см приводит к

ускорению коагуляции частиц в облаке, с другой стороны, рост частиц осадков сопровождается увеличением объемного электрического заряда и напряженности поля.

### ***Список литературы***

1. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии.- Нальчик: издательство КБНЦ РАН, 2008.-254 с.
2. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. Численное моделирование облаков. М., Гидрометеиздат, 1984.
3. Корчагина Е.А., Шаповалов А.В. Исследование на основе численной модели взаимодействия микрофизических и электрических процессов в конвективных облаках при их эволюции// Известия Вузов. Северо-Кавказский регион.-2004.-N 3. – С. 56-62
4. Корчагина Е.А., Кулиев Д.Д., Шаповалов А.В. Моделирование микроструктуры конвективного облака с учетом процесса контактной электризации облачных частиц// Известия КБНЦ РАН.-2008.-№6(26).-С.155-161.

## **ВЛИЯНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРАХ, НА ЭВОЛЮЦИЮ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ОСАДКОВ (ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)**

**Довгальук Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А., Торопова М.Л.,  
Куров А.Б., Волков Н.Н.**

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

Аэрозоли, поступающие в атмосферу при лесных пожарах (АЛП) оказывают большое влияние на развитие облаков и осадков. В настоящее время хорошо изучена роль этих аэрозолей как ядер конденсации, однако льдообразующее действие АЛП исследовано недостаточно.

В ГГО были выполнены лабораторные исследования иммерсионного и контактного механизмов кристаллизации капель. Получено, что температура кристаллизации капель воды с частицами золы (от  $-13,7^{\circ}$  до  $-5,2^{\circ}\text{C}$ ) превысила аналогичную температуру для дистиллированной воды (от  $-19,0^{\circ}$  до  $-14,7^{\circ}\text{C}$ ). Таким образом, частицы золы способны играть

роль дополнительных центров кристаллизации в каплях и вносить заметный вклад в повышение температуры их замерзания. Ранее были проведены аналогичные исследования для сажи. По сравнению с сажой зола обеспечивает замерзание капель при более высоких температурах.

С учетом этих данных выполнено численное моделирование эволюции конвективных облаков, развивавшихся на фоне задымления атмосферы АЛП, для двух физико-географических регионов: Московская обл. (случай 1) и Ленинградская обл. (случай 2). Использовались численные модели конвективного облака, разработанные в ГГО: полуторамерная и трехмерная.

Летом 2010г. в Московской области имели место крупные лесные и торфяные пожары. Выбран день 06.08.2010, когда сильное задымление атмосферы совпало во времени с развитием Сб и выпадением ливневых осадков. В качестве начальных условий взяты вертикальные профили температуры и влажности по данным радиозондирования (ст. Долгопрудный). Выполнено численное моделирование эволюции конвективного облака: 1) при отсутствии АЛП (вариант 1А); 2) при задымлении атмосферы (в качестве параметра варьировалась температура замораживания облачных капель:  $-13^{\circ}\text{C}$  – вариант 1В,  $-10^{\circ}\text{C}$  – вариант 1С). Эти значения соответствуют полученным в лабораторных экспериментах характерным значениям температуры замерзания капель, содержащих сажу и золу соответственно.

В табл. 1 приведены значения абсолютных максимумов основных характеристик облака, полученные по полуторамерной модели для вариантов 1А, 1В и 1С, а также высота и время их достижения. По данным моделирования получено, что при данном температурно-влажностном строении атмосферы образуются осадкообразующие конвективные облака с высотой верхней границы  $H_{\text{вг}}$ , достигающей 12,6 км. Их нижняя граница расположена высоко (3,5 км), что связано с большим дефицитом точки росы в нижних слоях тропосферы. Максимальные по пространству и времени значения скорости восходящего потока  $w$  (32,9 м/с), водности облачных ( $Q_c$ ) и дождевых ( $Q_r$ ) капель (2,5 и 2,4 г/м<sup>3</sup> соответственно), а также ледности градин  $Q_i$  и облачных ледяных кристаллов  $Q_{ic}$  (5,7 и 0,9 г/м<sup>3</sup> соответственно) характерны для хорошо развитого Сб. Выпадают осадки в виде дождя (максимум интенсивности  $I_r$  составляет 4,8 мм/ч); град не выпадает ( $I_i = 0$ ). Радиолокационная отражаемость облака  $Z$  достигла 49,6 дБZ.

**Максимальные значения основных характеристик облака,  
высота и время их достижения (Московская область, трехмерная модель).  
В скобках – результаты, полученные по полторамерной модели**

Величина	Вариант 1А			Вариант 1В			Вариант 1С		
	max	$z_{\max}$ , км	$t_{\max}$ , мин	max	$z_{\max}$ , км	$t_{\max}$ , мин	max	$z_{\max}$ , км	$t_{\max}$ , мин
$H_{\text{вр}}$ , км	14,6 (12,6)	–	34,5 (23,0)	14,6 (12,8)	–	29,5 (23,0)	14,6 (12,8)	–	29,2 (23,0)
$w$ , м/с	64,8 (32,9)	10,9 (10,4)	23,3 (19,9)	65,5 (35,1)	10,8 (10,6)	23,1 (19,8)	67,2 (36,1)	10,8 (10,6)	23,0 (19,6)
$Q_c$ , г/м <sup>3</sup>	3,7 (2,5)	6,6 (6,8)	22,2 (14,5)	3,7 (2,4)	6,4 (6,2)	22,1 (13,4)	3,4 (2,1)	5,4 (5,4)	21,7 (11,8)
$Q_r$ , г/м <sup>3</sup>	5,6 (2,4)	0,1 (2,0)	32,8 (29,9)	5,0 (2,6)	0,1 (1,8)	50,4 (28,3)	4,5 (2,6)	0,1 (1,8)	51,9 (26,9)
$Q_i$ , г/м <sup>3</sup>	5,6 (5,7)	5,1 (5,6)	29,1 (25,4)	4,8 (6,4)	4,0 (6,4)	32,6 (20,5)	3,9 (6,5)	4,2 (5,6)	29,6 (20,8)
$Q_{ic}$ , г/м <sup>3</sup>	2,3 (0,9)	9,8 (9,0)	22,3 (20,6)	3,2 (0,6)	7,7 (8,6)	22,7 (17,2)	3,4 (0,6)	7,7 (8,6)	22,7 (17,1)
$I_r$ , мм/ч	154,3 (4,8)	–	32,8 (33,0)	136,4 (13,8)	–	50,4 (31,0)	123,0 (18,3)	–	51,9 (31,0)
$I_i$ , мм/ч	65,6 (0,0)	–	32,2 (–)	46,6 (0,1)	–	45,3 (32,0)	28,5 (0,6)	–	33,0 (31,0)
$Z$ , дБZ	56,3 (49,6)	0,1 (1,8)	32,8 (30,0)	55,0 (50,2)	0,1 (1,8)	50,4 (29,0)	54,7 (50,3)	0,1 (2,2)	51,9 (27,0)

Далее были выполнены расчеты для ситуации, когда дымовой шлейф от лесных пожаров, смешиваясь с пересекающим его по вертикали конвективным облаком, оказывает влияние на фазовые и микроструктурные преобразования влаги в нем. В модель введены поправки, описывающие образование кристаллов за счет дополнительного замерзания жидких капель под действием сажи или золы. Температура замерзания воды задается в качестве параметра.

В таблице приведены значения максимумов основных характеристик облака при учете замораживания облачных капель при повышенных температурах (варианты 1В, 1С). В результате усиленного льдообразования происходит переход облачных капель в ледяные кристаллы. Этот процесс тем сильнее, чем выше температура замерзания капель под действием АЛП. Максимум  $Q_c$  по сравнению с 1А уменьшается. Тем не менее, не наблюдается роста  $Q_{ic}$ : кристаллы быстро коагулируют с дождевыми каплями и замораживают их, превращая в градины. Тем самым, запас кристаллов расходуется, а  $Q_i$  растет. Таким образом, по сравнению со случаем 1А усиливается осадкообразование. Происходит выпадение на подстилающую поверхность как дождя, так и града (1В – 0,1, 1С – 0,6 мм/ч). Резко увеличивается  $I_r$  вследствие таяния градин (1А – 4,8, 1В – 13,8, 1С – 18,3 мм/ч). Увеличивается радиолокационная отражаемость. Таким образом,

по данным полуторамерной модели, дополнительное льдообразование под влиянием АЛП способствует усилению осадкообразования.

Далее расчеты для того же случая (варианты 1А, 1В, 1С) были выполнены с помощью трехмерной модели. Она принципиально отличается от модели малой размерности тем, что позволяет отказаться от осреднения по координатам. Таким образом, можно выявить неоднородности структуры облака, которые не выявляются при осреднении. Кроме того, в трехмерной модели иным образом описывается взаимодействие облака с окружающей средой и существует возможность описывать взаимодействие облака с полем ветра, которое оказывает большое влияние на динамику конвекции. В табл. 1 приведены полученные в результате расчетов по трехмерной модели значения основных характеристик облака и осадков.

Сравнение результатов, полученных по двум моделям, показывает, что осреднение по горизонтальным координатам, применяемое в полуторамерной модели, сглаживает решение уравнений и занижает значения всех характеристик, особенно динамических (максимум  $w$  занижается почти в 2 раза – 64,8 против 32,9 м/с). Поскольку гидродинамика определяет все остальные процессы, осреднение занижает и остальные характеристики, особенно интенсивность осадков (максимальное значение – в десятки раз). Особо отметим, что интенсивность осадков более 100 мм/ч наблюдается только над узкой горизонтальной областью.

Второй причиной различия результатов расчетов является взаимодействие облака с фоновым ветром, которое учитывается только в трехмерной модели. Ветер, изменяющийся с высотой, и турбулентность приводят к сложному характеру гидротермодинамических течений. В связи с этим, в частности, образуются относительно слабые вертикальные потоки даже в стороне от моделируемого облака. Поэтому облако образуется не одиночное, как в полуторамерной модели, а в совокупности с полем других конвективных облаков меньшей мощности, что соответствует реальным условиям. Восходящие потоки, возникающие в верхних слоях атмосферы, приводят к образованию ледяных кристаллов ( $S_i$ ). Они взаимодействуют с  $S_b$  (самозасев). Все эти эффекты в полуторамерной модели не проявляются.

На рис. 1 представлен временной ход максимальных значений основных характеристик конвективных облаков и осадков для вариантов 1А, 1В, 1С. Под влиянием АЛП заметно увеличивается  $Q_{i,c}$  за счет замораживания облачных капель ( $Q_c$ , тем самым, убывает). Что касается содержания осадков, то, в отличие от результатов, полученных по полуторамерной модели, оно при наличии АЛП уменьшается. Это же сказывается и на интенсивности дождя и града у подстилающей поверхности. Связано это с тем, что многообразие микрофизических процессов, протекающих в облаке (фазовые переходы, коагуляция) зависит от пространственного распределения

пара, воды и льда, которое, в свою очередь, определяется динамикой конвективных потоков. Таким образом, учет неоднородности воздушных потоков, а, следовательно, и распределения влаги привел к качественно иному результату. В данном случае основная масса кристаллов, образовавшихся под влиянием АЛП и в результате самозасева облака, в значительной степени оказывается в одной области пространства с градинами. Полагается, что ледяные частицы не коагулируют между собой. Следует учесть и тот факт, что интенсивное образование облачного льда происходит и без влияния АЛП (1А), а в случае дополнительного льдообразования происходит перезасев облака. Этим объясняется ослабление осадкообразования, которое особенно сильно выражено для града в варианте 1С (рис. 1д). Уменьшение массы градин способствует и уменьшению массы дождевых капель, так как важным источником последних является таяние льда.

Осадкообразование для варианта 1С протекает еще слабее, чем для 1В (рис. 1в–е). Отметим, что с некоторого момента времени интенсивность осадков для случаев 1В и 1С, напротив, незначительно возрастает по сравнению с 1А (результат накопления влаги в облаке).

На рис. 2 представлено трехмерное поле суммы водности облачных капель и ледности кристаллов для вариантов 1А и 1С. Несимметричный характер конвективных течений, а, следовательно, и облаков обусловлен влиянием турбулентности.

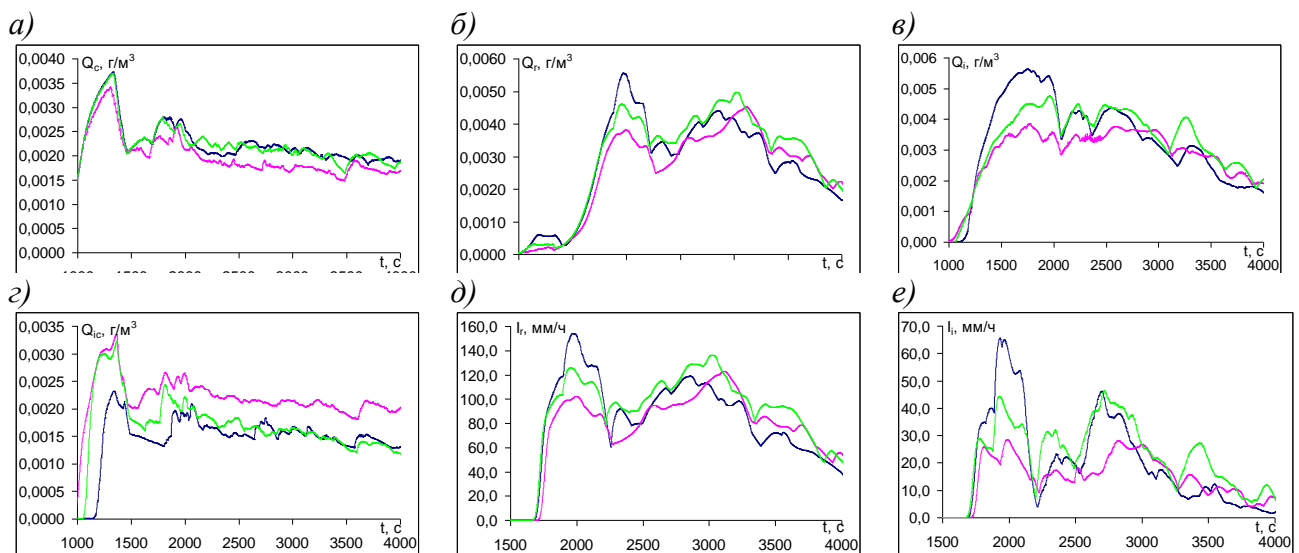


Рис. 1. Трехмерная модель. Временной ход максимальных значений: а) водности облачных капель; б) водности дождевых капель; в) ледности градин; г) ледности облачных кристаллов; д), е) интенсивности дождя и града соответственно у подстилающей поверхности. Синие кривые – вариант 1А, зеленые – 1В, красные – 1С.

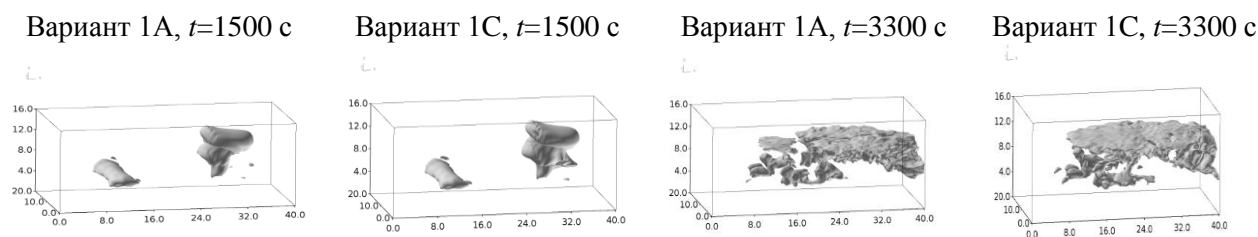


Рис. 2. Трехмерный вид суммарного поля водности облачных капель и ледности облачных кристаллов. Исоповерхность  $1,0 \text{ г/м}^3$ .

Таким образом, расчеты по полной трехмерной модели дают возможность проследить эволюцию конвективного облака во всем многообразии гидродинамических течений и микрофизических процессов с учетом их пространственной неоднородности. Модель позволяет оценить влияние АЛП на облака и осадки.

Рассмотрим результаты аналогичных расчетов для Ленинградской области. 22.07.2016 г. ее покрыл аэрозольный шлейф от отдаленных лесных пожаров; наблюдалась сильная мгла. Она исчезла 25.07 в результате смены направления ветра. На фоне загрязнения атмосферы АЛП 24.07 наблюдалось образование и развитие грозоградовых Сб. По аналогии (варианты 2А, 2В, 2С) выполнены расчеты характеристик облака и осадков по полуторамерной модели. В качестве начальных условий взяты вертикальные профили температуры и влажности по данным радиозондирования за 24.07 (ст. Воейково). Они существенно отличаются от случая 1.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. Значение  $H_{\text{вр}}$  оказалось меньше, чем в случае 1 (9,6 против 12,6 км) из-за наличия протяженного сухого слоя. Это сказалось и на максимальном значении  $w$  (20,4 против 32,9 м/с). Максимумы водности и ледности оказались одного порядка со случаем 1, но  $Q_{\text{и с}}$  оказалась больше почти в 2 раза. При этом интенсивность осадков у земли для случая 2 оказалась заметно больше: дождь – 11,1 против 4,8 мм/ч; град – 1,9 против 0 мм/ч. Это объясняется большей увлажненностью подоблачного слоя и меньшей высотой нижней границы облака (2,0 против 3,5 км); осадки, падающие под облаком, слабее испаряются. Как и в случае 1, учет влияния АЛП на эволюцию облака привел к увеличению содержания дождевых капель и градин, а также к усилению выпадения дождя и града.

Таблица 2

**Максимальные значения основных характеристик облака, высота и время их достижения (Ленинградская обл., трехмерная модель)**

В скобках – результаты, полученные по полуторамерной модели

Величина	Вариант 2А			Вариант 2В			Вариант 2С		
	max	$z_{\max}$ , КМ	$t_{\max}$ , МИН	max	$z_{\max}$ , КМ	$t_{\max}$ , МИН	max	$z_{\max}$ , КМ	$t_{\max}$ , МИН
$H_{\text{вр}}$ , КМ	14,0 (9,6)	–	34,8 (28,0)	14,2 (10,2)	–	34,1 (28,0)	14,2 (10,4)	–	33,8 (41,0)
$w$ , М/С	53,5 (20,4)	9,8 (4,4)	23,3 (11,7)	55,8 (20,4)	10,1 (4,4)	23,4 (11,7)	56,6 (20,4)	10,0 (4,4)	23,3 (11,7)
$Q_c$ , Г/М <sup>3</sup>	4,0 (2,7)	4,7 (4,8)	20,4 (11,8)	4,0 (2,7)	4,8 (4,8)	20,4 (11,8)	4,0 (2,7)	4,6 (4,8)	20,3 (11,8)
$Q_r$ , Г/М <sup>3</sup>	6,9 (2,3)	0,1 (2,2)	33,0 (25,2)	6,7 (2,6)	0,1 (2,0)	33,1 (24,9)	6,4 (2,7)	0,1 (2,0)	33,3 (24,6)
$Q_i$ , Г/М <sup>3</sup>	9,9 (5,0)	3,3 (3,8)	30,9 (21,5)	10,0 (6,7)	3,4 (3,8)	30,6 (21,4)	10,0 (7,1)	3,5 (3,8)	31,3 (21,1)
$Q_{ic}$ , Г/М <sup>3</sup>	1,7 (0,4)	8,9 (8,4)	22,2 (21,5)	2,7 (0,5)	7,1 (7,8)	20,9 (19,9)	3,4 (0,5)	7,1 (7,8)	21,0 (19,7)
$I_r$ , ММ/Ч	194,4 (11,1)	–	33,0 (28,0)	187,5 (18,0)	–	33,0 (27,0)	179,2 (19,8)	–	33,3 (27,0)
$I_i$ , ММ/Ч	172,8 (1,9)	–	33,4 (26,0)	163,4 (5,4)	–	33,5 (26,0)	154,8 (6,0)	–	33,7 (25,0)
$Z$ , ДБZ	58,0 (49,5)	0,1 (2,0)	33,0 (25,0)	57,7 (50,4)	0,1 (1,8)	33,1 (25,0)	57,4 (50,6)	0,1 (1,6)	33,3 (25,0)

Рассмотрим результаты трехмерного моделирования (табл. 2 и рис. 3). Форма и размер моделируемого облака существенно отличаются от случая 1: оно имеет меньшие размеры по вертикали и горизонтали, отсутствует широкая наковальня. Связано это с различием как температурно-влажностного строения атмосферы, так и поля фонового ветра (в случае 2 ветер слабее). Характер динамики трехмерных течений оказывается менее сложным, чем в случае 1, и облака, образующиеся в стороне от моделируемого, имеют меньшую мощность.



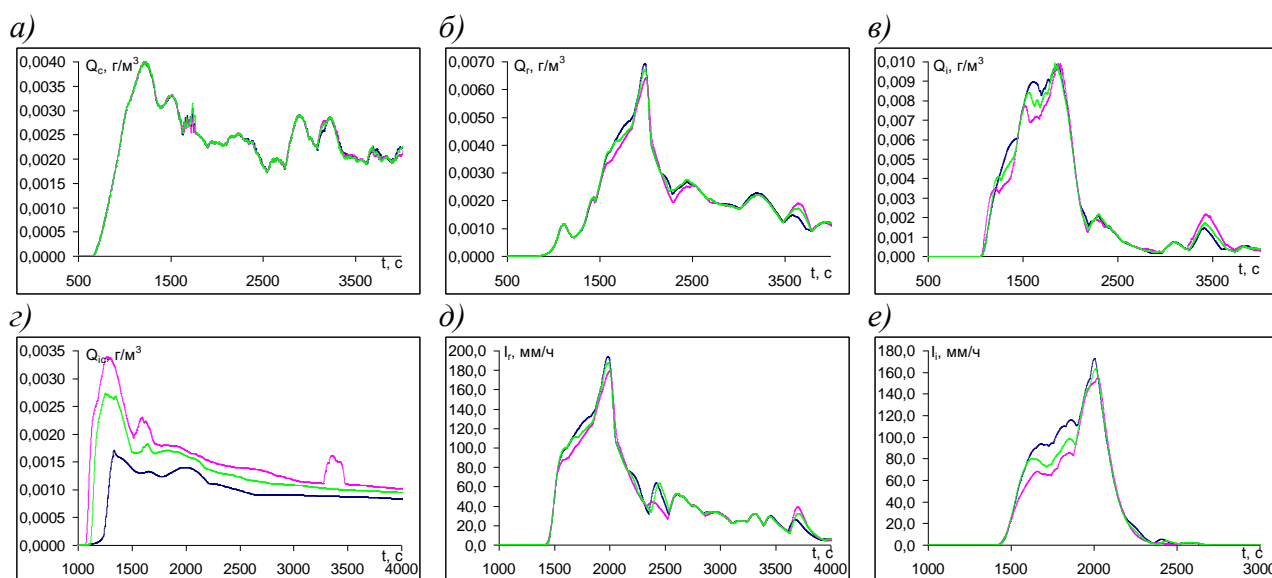


Рис. 3 – Трехмерная модель. Временной ход максимальных значений: а) водности облачных капель; б) водности дождевых капель; в) ледности градин; г) ледности облачных кристаллов; д), е) интенсивности дождя и града соответственно у подстилающей поверхности. Синие кривые – вариант 2А, зеленые – 2В, красные – 2С.

Как и для случая 1, отказ от осреднения приводит к увеличению максимальных значений всех характеристик облака и особенно осадков.

Заметным различием случаев 1 и 2 является слабое изменение пространственного максимума  $Q_c$  под действием АЛП (рис. 3а). Это связано с тем, что область, где расположен указанный максимум, расположена ниже области замерзания, что обусловлено особенностями температурно-влажностного строения атмосферы. Прочие характеристики (рис. 3) также гораздо слабее зависят от наличия АЛП, чем в случае 1. Это касается не только их временных ходов, но и пространственных распределений.

Сравнение вариантов 2А, 2В, 2С показывает, что, как и в случае 1, по мере повышения температуры замерзания капель под действием АЛП наблюдается плавное уменьшение массы частиц осадков. Это противоположно результатам, полученным по полуторамерной модели.

Данный вопрос требует дополнительного исследования. По результатам анализа расчетов будет проведено уточнение микрофизического блока в обеих моделях, особенно в части процессов, происходящих с участием облачных ледяных кристаллов. Также следует расширить число исследуемых случаев с охватом разных физико-географических регионов. Целесообразно рассмотреть ситуации, когда образование облачных кристаллов в отсутствие задымления не происходит.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 16-05-00197\_a, 15-05-05719\_a, 17-55-80048 БРИКС\_a, 17-05-00965\_a.

# ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЖИДКОСТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В РАБОТАХ ПО ИСКУССТВЕННОМУ УВЕЛИЧЕНИЮ ОСАДКОВ И ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЕ

Колосков Б.П.<sup>1</sup>, Частухин А.В.<sup>1</sup>, Бычков А.А.<sup>1</sup>, Петрунин А.М.<sup>1</sup>, Корнеев В.П.<sup>1</sup>,  
Василенко С.В.<sup>2</sup>, Ильин В.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АНО «Агентство АТТЕХ», г. Москва

<sup>2</sup> ГУП РК «Крымский Элеватор», Симферополь

<sup>3</sup> AGF Anti-Granizo Fraiburgo Ltda, Фрайбурго, Бразилия

## 1. Введение

В настоящее время в мировой практике активных воздействий на облака с целью искусственного регулирования осадков (ИРО) и предотвращения выпадения града широко используются наземные аэрозольные пиротехнические и ацетоновые генераторы, диспергирующие льдообразующий аэрозоль на основе йодистого серебра. Несомненным достоинством применения наземных генераторов при проведении активных воздействий (АВ) на облака является их простота и относительная дешевизна по сравнению с самолетными и ракетно-артиллерийскими способами засева облаков.

Наземные генераторы широко применяются в таких странах, как Марокко, США, Куба, Испания, Франция, Канада, Бразилия, Аргентина и др. В частности, в Марокко, США и на Кубе наземные генераторы используются в программах искусственного увеличения осадков (ИУО), во Франции, Испании, Бразилии, Аргентине – в противоградовых работах.

Анализ результатов, как исследовательских, так и практических работ показывает, что в разных странах использование наземных генераторов для воздействия на градовые облака позволяет снизить риски на 40–50% [5, 6], а при вызывании дополнительного количества осадков произвести их увеличение на 20–70% на территории мишени [3, 4].

В представленном докладе описываются результаты численного моделирования и активных воздействий на облака на территории Крымской фруктовой компании в Красногвардейском районе Республики Крым с помощью разработанных в АНО «Агентство АТТЕХ» наземных аэрозольных жидкостных генераторов НАГ-07А, и на защищаемой территории компании AGF Anti-Granizo Fraiburgo Ltda (штат Санта Катарина, Бразилия) с использованием наземных аэрозольных жидкостных генераторов бразильского производства.

## 2. Использование наземных аэрозольных жидкостных генераторов для ИУО

В соответствии с договором между «Агентством АТТЕХ» и «Крымской фруктовой компанией» в октябре-ноябре 2016 г. в Красногвардейском районе, Республики Крым были проведены демонстрационные работы по ИУО с использованием НАГ-07А» (рис. 1). Генератор состоит из трех составных частей: баллона со сжатым воздухом, емкости с химическим составом и собственно генератора, где происходит пульверизация и сжигание состава в турбулентной среде. В качестве реагента в генераторе используется раствор йодистого серебра в ацетоне. Основные характеристики генератора НАГ-07А приведены в Таблице 1.



Рис. 1. Наземный аэрозольный ацетоновый генератор НАГ-07А.

Таблица 1

### Основные характеристики генератора НАГ-07А

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1.	Расход реагента, л/час	1,1
2.	Объем воздушного баллона, л	45
3.	Объем баллона с реагентом, л	18
4.	Время непрерывной работы заправленного полностью генератора, час	16
5.	Габаритные размеры в транспортном положении ДхВхШ, мм	900 x 1095 x 390
6.	Масса нетто, кг	68
7.	Выход льдообразующего аэрозоля при минус 10°С, част/сек, не менее	10 <sup>12</sup>

Для руководства работами был организован Оперативный центр (ОЦ), расположенный на территории противорадиолокационного отряда Красногвардейского района. В ОЦ было организовано получение с 4-х минутной периодичностью радиолокационной информации об облачности и осадках на территории работ на длинах волн 3 см и 10 см с помощью автоматизированного радиолокационного метеорологического комплекса (АРМК), созданного на базе радиолокатора МРЛ-5. Наряду с радиолокационной информацией, в ОЦ осуществлялся приём через Интернет синоптической, метеорологической и спутниковой информации, а

также наземных метеоданных с установленного специалистами Агентства в с. Петровка Метеокомплекса Davis, позволяющего измерять атмосферное давление, температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра, количество осадков.

Для иллюстрации АВ на облака с помощью НАГ-07А ниже рассмотрен случай воздействий, проведенных 29-30 октября 2016 г.

Синоптические условия 29-30 октября 2016 г. определялись прохождением холодного фронта через Крымский полуостров в ночь на 30-е октября. Облачная система холодного фронта состояла из нескольких полос слоистой и слоисто-дождевой облачности с верхней границей 5-7 км и шириной от 50 до 150 км, перемещавшихся над территорией Крыма в направлении 90-120 градусов со скоростью около 50 км/час.

Для выработки схемы расстановки генераторов, выбора режимов их работы и принятия решения о начале и конце воздействий, с помощью разработанной в Агентстве трехмерной численной модели «SeedDisp» [1] было проведено моделирование процесса переноса реагента в подоблачном слое атмосферы с учетом рельефа местности и использованием данных наземных наблюдений метеостанцией в Симферополе, данных о вертикальном профиле ветра, полученных станциями радиозондирования в Одессе, Туапсе и Ростове-на-Дону.

Принимая во внимание результаты численного моделирования, направление и скорость переноса зон радиоэха, а также местоположение площадей, определённых заказчиком в качестве территорий (мишеней), на которых требовалось увеличить осадки, в 18:45 были включены два генератора НАГ-1 и НАГ-2, размещенные на позиции установки радиолокатора МРЛ-5, и в 20:15 два генератора НАГ-3 и НАГ-4 на удалении 40 км к юго-западу от радиолокатора МРЛ-5.

На рис. 2 в качестве иллюстрации приведены горизонтальное на высоте 500 метров (рис. 2,а) и вертикальное (рис. 2,б) сечения полей концентраций частиц реагента на момент времени 21:15, т.е. через 2,5 часа после включения генераторов 1-2 и через час после включения генераторов 3-4. На рис. 2 также показаны расположение радиолокатора МРЛ-5, мишени в районе пос. Октябрьское, на которой требовалось увеличить осадки, и точек установки наземных генераторов (1-2 и 3-4) во время проведения работ по АВ 29-30 октября 2016 г.

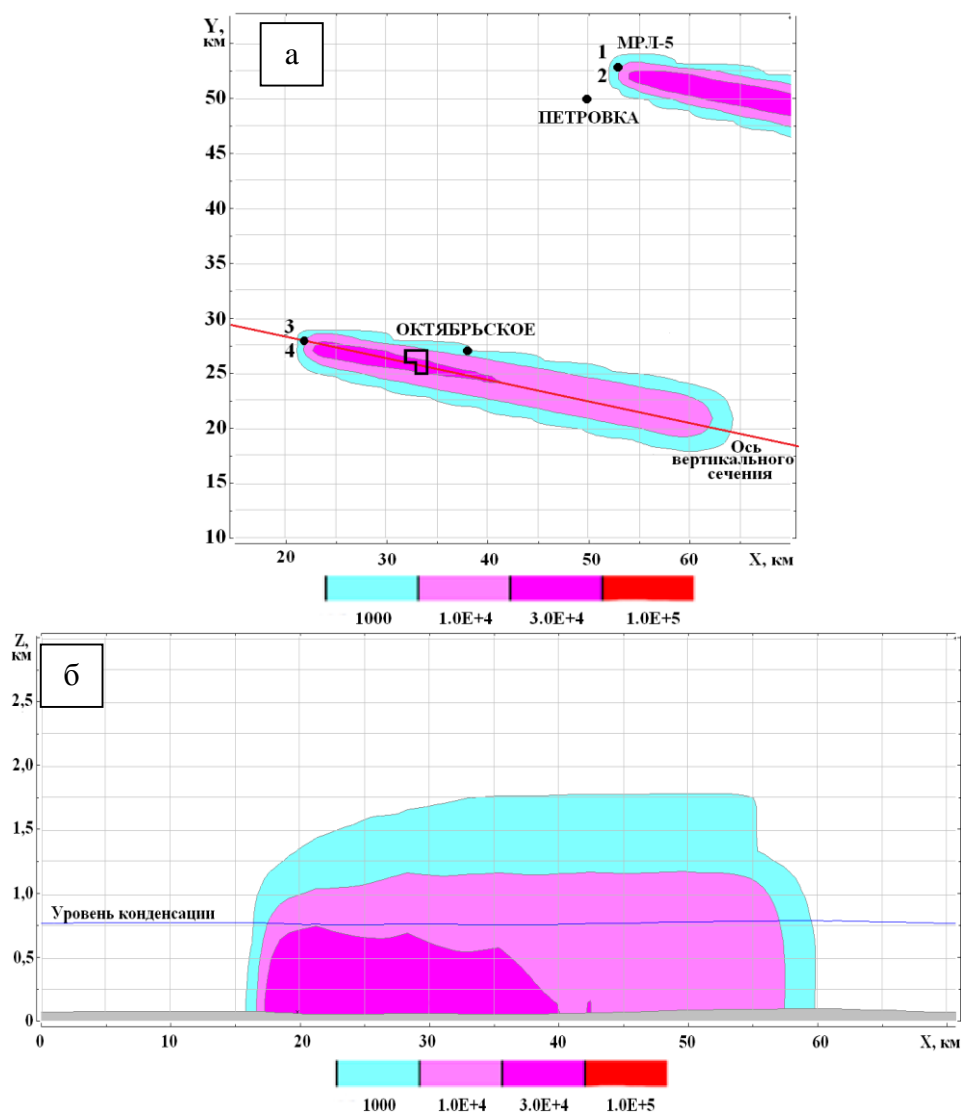


Рис. 2. Изображения полей концентраций частиц реагента (част/м<sup>3</sup>) в 21:15, 29.10.2016 г.:  
 а) горизонтальное сечение на высоте 500 метров относительно рельефа;  
 б) вертикальное сечение концентрации частиц реагента от генераторов 3-4.

Анализ результатов численного моделирования переноса реагента при воздействии НАГ-07А показал, что через час после начала работы генераторов поле реагента с необходимой концентрацией (более  $1 \cdot 10^4$  част/м<sup>3</sup>) распространялось от места установки генераторов на расстояние более 40 км, уже через 2-3 км от места установки генераторов достигало высоты уровня конденсации (нижней границы облачности), и затем поддерживалось на этой высоте на протяжении всего времени работы генераторов.

С целью оценки результатов воздействий был проведен сравнительный анализ радиолокационных характеристик облачности и осадков в зонах, расположенных до пунктов установки генераторов (с наветренной стороны от генераторов), и в зонах после генераторов (над мишенью). Анализ радиолокационной информации, полученной 29-30 октября 2016 г., показал, что в результате проведения воздействий на облака с помощью генераторов НАГ-3 и НАГ-4:

– высота верхней границы радиоэхо облачности (рис. 3,а), в зонах после генераторов (над мишенью), через 20-25 минут после их включения была на 2-3 км выше, чем в зонах до генераторов;

– максимальные значения радиолокационной отражаемости (рис. 3,б) через 15-20 минут после включения генераторов была над мишенью на 15-20 dBZ больше, чем в зонах до генераторов. И как следствие, в зонах, расположенных на площади мишени, интенсивность осадков была на 4-6 мм/ч больше, чем в зонах облачности до генераторов (рис. 3,в).

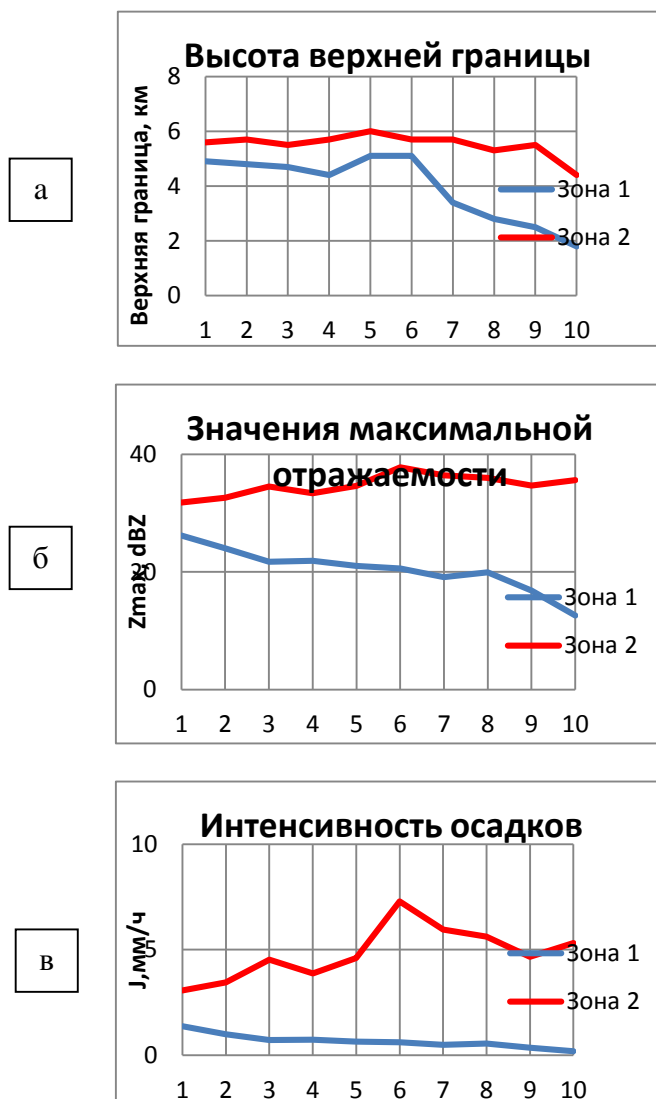


Рис. 3. Изменение высоты верхней границы радиоэхо облачности (а), максимальной отражаемости (б) и интенсивности осадков (в): зона 1 – облачность до генераторов, зона 2 – облачность после генераторов НАГ-3 и НАГ-4 (над мишенью).

Таким образом, как видно из приведенных на рисунке 3 графиков, при прохождении облачности над генераторами происходило увеличение высоты верхней границы, значений максимальной отражаемости и интенсивности осадков, что свидетельствует о положительном эффекте воздействия генераторами НАГ-07А на облачность, наблюдавшуюся 29-30 октября 2016 .

### 3. Использование наземных аэрозольных жидкостных генераторов в противоголодовой защите

Учитывая успешный опыт противоголодовых работ наземными ацетоновыми генераторами в Бразилии компанией Anti-Granizo Fraiburgo Ltda (AGF) и результаты работ АНО "Агентство АТТЕХ" в области создания и внедрения новых пиротехнических наземных аэрозольных генераторов с многофункциональной системой управления, в 2015 г. было принято решение о проведении на защищаемой территории компании AGF в Бразилии демонстрационных работ по воздействию на облака с использованием наземных аэрозольных генераторов НАГ-07М российского производства (рис.4,а) [2] с активными болгарскими пиротехническими элементами АГ-2Н (рис.4,б) и бразильских наземных ацетоновых генераторов (рис.4,в). Основные технические характеристики генератора НАГ-07М и бразильского наземного ацетонового генератора приведены в Таблицах 2 и 3, соответственно.

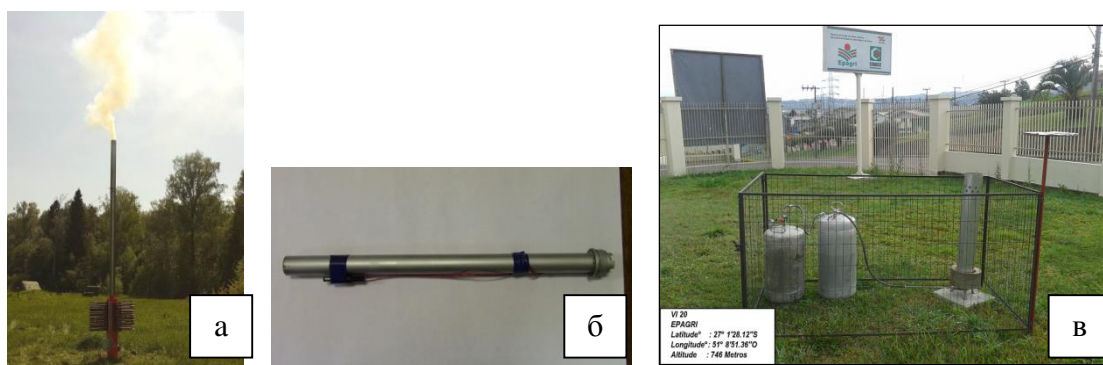


Рис. 4. Общий вид наземного аэрозольного генератора НАГ-07М (а) с установленными активными элементами «АГ-2Н» (б) и бразильский наземный ацетоновый генератор (в).

Таблица 2

#### Основные технические характеристики генератора НАГ-07М

№№	Наименование параметра	Значение
1.	Максимальное количество активных элементов, шт.	80
2.	Количество одновременно запускаемых активных элементов, шт.	от 1 до 3 (заводские настройки)
3.	Интервал между запусками активных элементов, с	360 (заводские настройки)
4.	Система управления	Блок управления, пульт управления, сотовый телефон.
5.	Время работы одного активного элемента, с	360 ± 30
6.	Габаритные размеры стойки УЗДУ на основании, ВхДхШ, мм	1114 x 300 x 300
7.	Габаритные размеры стойки УЗДУ на основании с активными элементами, ВхДхШ, мм	1114 x 834 x 834
8.	Масса без активных элементов, кг	49

**Основные технические характеристики наземного ацетонового генератора**

№	Наименование параметра	Значение
1.	Масса льдообразующего раствора, л	40
2.	Время непрерывной работы заправленного генератора, ч	36
3.	Расход раствора, л/ч	1,1
4.	Выход льдообразующего аэрозоля при температуре минус 7,5°С, част/г	$2 \times 10^{14}$

Для иллюстрации результатов АВ на облака с помощью бразильских наземных ацетоновых генераторов ниже рассмотрен случай воздействий, проведенных 16-17 сентября 2015 г. Синоптические условия 16-17 сентября 2015 г. определялись прохождением холодного фронта через территорию штата Санта Катарина, сопровождавшегося выпадением интенсивных осадков и града из многоячейковых конвективных облаков высотой до 15,8 км.

Принимая во внимание радиолокационную информацию по команде ОЦ, расположенного вблизи радиолокатора МРЛ-5, с 20:02 до 22:00, 16 сентября с целью предотвращения выпадения града на защищаемой территории АGF были включены генераторы 1-32 (рис. 5,а).

Следует отметить, что по данным метеонаблюдений 16-17 сентября было зарегистрировано выпадение града на защищаемой территории в 00:07, 17 сентября в пункте 43 и в 00:12, 17 сентября в районе Monte Carlo и в пункте 41 (рис. 5,а).

Результаты численного моделирования переноса реагента при воздействии наземными ацетоновыми генераторами, полученные с помощью численной модели «SeedDisp», показали, что при выбранной схеме включения генераторов в районах выпадения града (пункты 43, 41 и Монте Карло) не наблюдалось зон с необходимой для предотвращения града (более  $1 \cdot 10^4$  част/м<sup>3</sup>) концентрацией частиц реагента (рис.5,а). Как следует из рис.5(б), для того, чтобы получить в этих районах необходимую концентрацию частиц реагента, надо было включить генераторы в пункте 43 и в районе Monte Carlo (пункты 37 – 42).



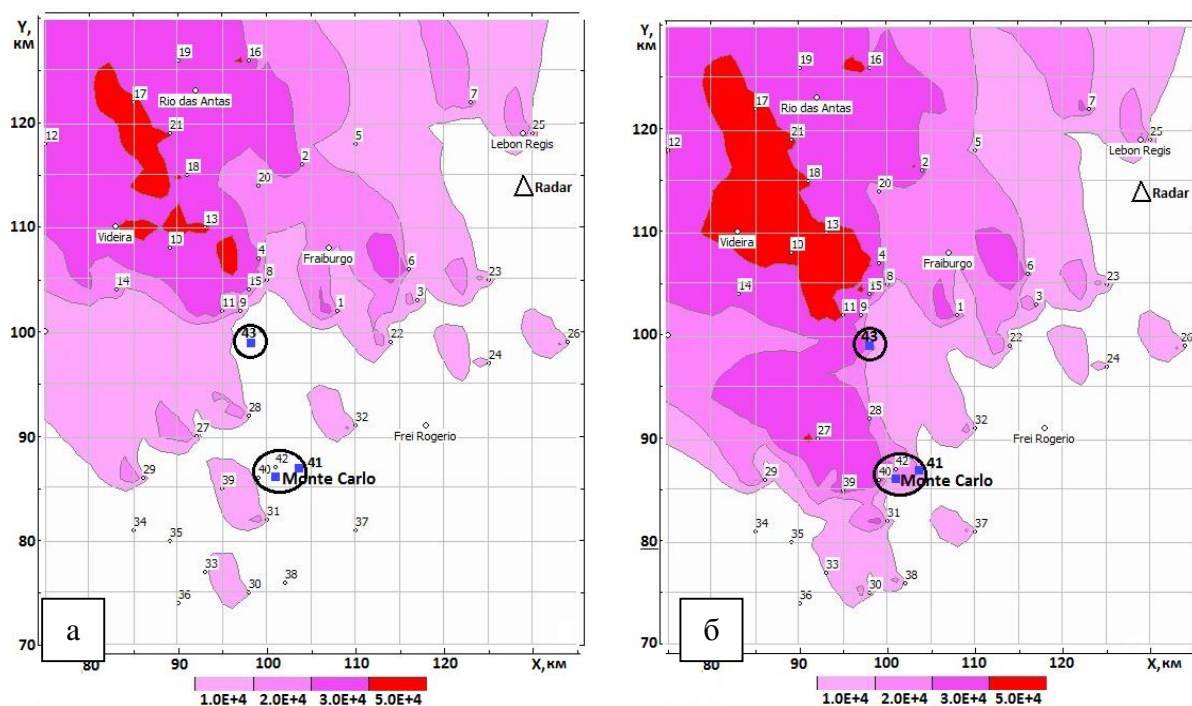


Рис. 5. Изображение полей концентраций частиц реагента ( $\text{част}/\text{м}^3$ ) на высоте 500 метров относительно рельефа в 00:10, 17.09.2015 г. при воздействии генераторами 1-32 (а) и после дополнительного включения генераторов в пунктах 37-43 (б).

## Выводы

Анализ результатов активных воздействий на облака с помощью наземных аэрозольных жидкостных генераторов:

- свидетельствует об эффективности использования таких генераторов как в работах по искусственному увеличению осадков, так и при проведении работ по противоголодовой защите;
- указывает на целесообразность использования численного моделирования для выработки схемы расстановки наземных генераторов, выбора режимов их работы и принятия решения о начале и конце воздействий.

## Список литературы

1. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Клейменова А.В., Сергеев Б.Н., Шаповалов А.В., Чочаев Х.Х., Бейтуганов М.Н. Численное моделирование переноса реагента при работах по активным воздействиям на облака // *Метеорология и гидрология*, 2012, с. 44-54.
2. Петрунин А.М., Корнеев В.П., Колосков Б.П., Частухин А.В., Бычков А.А., Ким Н.С., Сергеев Б.Н. Исследования распространения льдообразующего реагента в пограничном слое атмосферы при воздействии наземными аэрозольными генераторами «НАГ-07М». // *Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета «Наука. Инновации. Технологии»*. - 2016 - №3 - С. 69-82.
3. Bishop J.T. Six weeks of cloud seeding in South-Western Alberta. // *J.Weather Modif.* – 1978. – Vol.10 - № 1 - P.51-53.

4. Bishop J.T. The increase in the number of rain and a decrease of hailstone in a project in southwest Alberta (Canada). // J.Weather Modif. – 1979. – Vol.11 - № 1 - P.71-72.

5. Program graduading activities of the National Association for research and fight against dangerous meteorological phenomena (France): 1976 // Assoc.Nat.Lutte Contre Fleaux Atmos. 1977. № 25. P. 3-38.

6. Program graduading National Association for research and fight against dangerous meteorological phenomena (France): 1978//Assoc. Nat. Lutte Contre Fleaux Atm. 1980. №28. P.2-18.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ И ТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСАДКООБРАЗУЮЩИЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ОБЛАКА**

**Владимиров С. А.<sup>1</sup>, Пастушков Р. С.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУ «Центральная Аэрологическая Обсерватория», г. Долгопрудный, МО

<sup>2</sup>Московский Физико-Технический Институт, г. Москва

### **1. Введение**

При планировании проведения активных воздействий (АВ) на облака необходимо учитывать все многообразие факторов, определяющих формирование облачности. При образовании конвективных облаков помимо стратификации, имеющей слою неустойчивости, таковыми факторами являются аэрозольное состояние атмосферы и термические характеристики подстилающей поверхности. Размер и концентрация атмосферных аэрозолей, выступающих в роли облачных ядер конденсации (ОЯК), определяют размер и концентрацию формирующихся на них облачных капель, дальнейшая эволюция которых определяет развитие осадкообразования в облаке.

Имеется довольно большое количество исследований, посвященных влиянию атмосферных аэрозолей на микрофизическую структуру облаков и формирование осадков. Ссылки на них можно найти в [1-3]. Наряду с экспериментальными наблюдениями имеется большое количество численных моделей. При численном моделировании данного процесса, строго говоря, требуется детальное рассмотрение эволюции спектров облачных частиц от начальной

стадии – активации ОЯК, до конечной – выпадения крупных жидких и твердых частиц осадков на подстилающую поверхность. Такое рассмотрение реализуется в ряде существующих численных моделей, например в [1] с двумерной пространственной динамикой.

В работе [2] на основе двумерной пространственной численной модели с детальным спектральным рассмотрением микрофизики [1] исследуется развитие конвективных облаков при различных реально наблюдаемых аэрозольных характеристиках атмосферы, от «морских» облаков при малой концентрации ОЯК до «пирооблаков» (развивающихся в условиях задымленности от лесных пожаров). Как и в ряде других исследований, получено, что увеличение концентрации субмикронных аэрозолей вызывает интенсификацию мощного конвективного облака. Однако влияние такого увеличения на количество выпадающих осадков оказывается зависимым от ряда других факторов, таких, как влажность атмосферы и степень ее неустойчивости.

## **2. Учет влияния аэрозольного состояния атмосферы в модели с параметризацией микрофизических процессов**

Существует безусловная зависимость процесса формирования крупных облачных («дождевых») капель (или в терминах используемого в нашей модели аналога параметризации Кесслера «автоконверсии») от концентрации и спектра фоновых облачных ядер конденсации, которые, как правило, являются аэрозолями. При разработке численной трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака [4-5] была предложена простая модификация параметризационной схемы Кесслера [6-8], позволяющая учитывать влияние атмосферных аэрозолей (фоновых ОЯК) на формирование жидких осадков. Данная модификация состоит в выделении трех режимов формирования облачных капель: «морского» при малой концентрации ОЯК, «континентального» при большой концентрации и промежуточного. Для каждого из этих режимов устанавливаются свои параметры Кесслера, а именно скорость «автоконверсии» и порог ее возникновения. Значения этих параметров остаются обычно используемыми для промежуточного режима. Для морского режима уменьшается порог автоконверсии, а для континентального уменьшается амплитуда и увеличивается порог автоконверсии. Результаты расчетов моделирования развития мощного конвективного облака при одной и той же стратификации, но при разных аэрозольных условиях в атмосфере, приведены на рисунках 1,2, на которых показана эволюция максимума вертикальной компоненты скорости и общих масс облачных капель (мелких неоседающих) и крупных «дождевых». Получено, что изменение параметров Кесслера используемым способом в зависимости от концентрации аэрозольных частиц, влияет на развитие конвективного облака аналогично тому, как это было получено в исследованиях с моделированием спектра облачных частиц [1,2]. При этом влияние повышенной

концентрации ОЯК проявляется не только в замедлении развития осадкообразования (рис.2), что следует из самой параметризации, но и в интенсификации конвекции (рис.1).

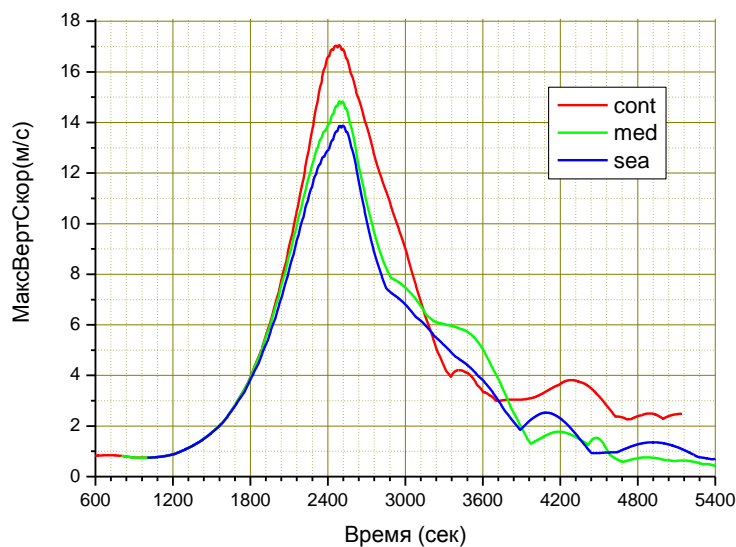


Рис.1. Эволюция максимума вертикальной скорости при пониженной (синяя линия), повышенной (красная) и промежуточной (зеленая) концентрациях ОЯК.

В нашем варианте модели [9] при АВ гигроскопическим реагентом с использованием концепции Кесслера установлено изменение параметров автоконверсии в области воздействия до наиболее благоприятных «морских» значений. Гигроскопическое «воздействие» в подоблачный слой состоит в изменении параметров автоконверсии, начиная с заданного момента времени в облачном объеме с заданными координатами на нижней границе облака. Эти параметры остаются неизменными в этом объеме по мере его перемещения внутри облака. Ледообразующее воздействие моделируется внесением в задаваемый момент времени в область с задаваемыми координатами льдообразующих ядер задаваемой концентрации, на которых образуются ледяные кристаллы, дальнейшая эволюция которых наряду с эволюцией прочих облачных частиц определяется основным микрофизическим блоком модели. Результаты экспериментов показали (рис. 3), что наибольший эффект увеличения осадков возможен при повышенной концентрации фоновых облачных ядер конденсации. При этом воздействия, основанные на гигроскопических эффектах мелкодисперсного аэрозоля, следует производить в подоблачном слое на начальном этапе развития облака. Место воздействия при этом должно быть вблизи середины восходящих потоков. Для усиления эффекта возможно комбинированное АВ. Дополнительно к гигроскопическому на стадии развитого облака в его переохлажденную область (ближе к центру) вводятся искусственные льдообразующие ядра.

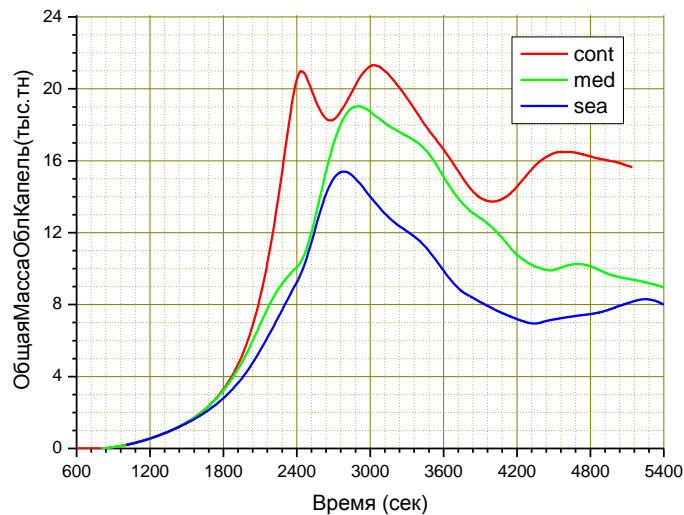
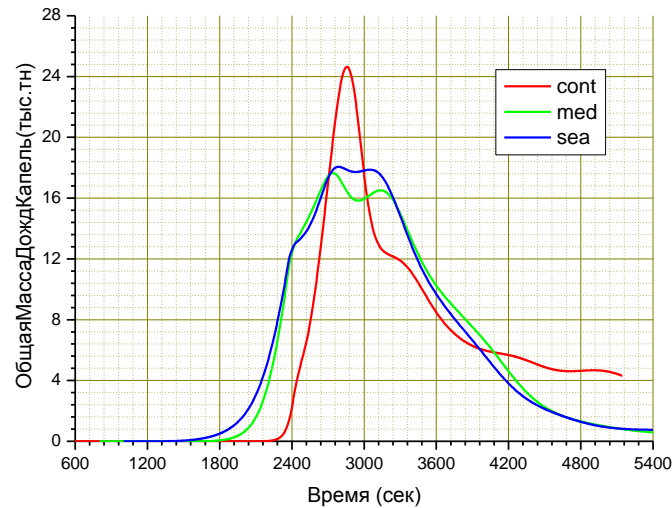


Рис.2 Эволюция общей массы мелких облачных капель (нижняя часть рисунка) и крупных «дождевых» капель при пониженной (синие линии), повышенной (красные) и промежуточной (зеленые) концентрациях ОЯК.

При пониженной и нормальной концентрации атмосферных ОЯК увеличение осадков можно достичь через воздействия, основанные на гигроскопических эффектах крупнодисперсного аэрозоля, во внутриоблачное пространство на стадии развитого облака (возможно комбинированно с льдообразующим воздействием). При этом эффект увеличения осадков оказывается существенно ниже.

При слабой конвекции без осадков, но с наличием в облаке переохлажденных областей, предпочтительным может оказаться льдообразующий способ воздействия.

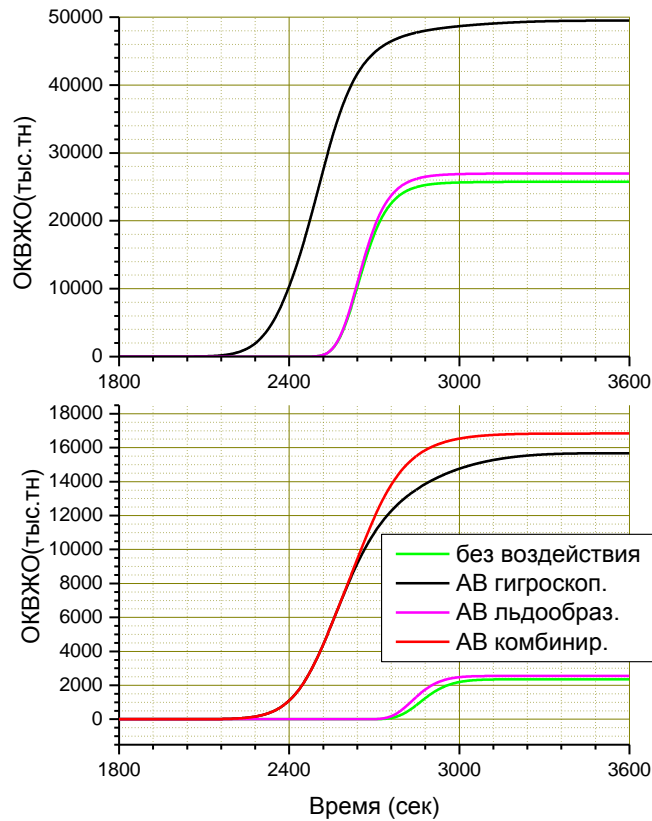


Рис. 3. Эволюция общего количества выпавших жидких осадков при повышенной концентрации фоновых ОЯК при естественном развитии (зеленые линии) и с АВ гигроскопическими мелкодисперсными (черные), льдообразующим (лиловые) и комбинированными (красные) для случаев спонтанной (низ) и вынужденной (верх) конвекции.

### 3. Влияние неоднородностей термических характеристик при инициализации влажной конвекции в модели

Моделирование конвективной облачности в общем случае должно с наибольшей степенью приближения представлять естественное развитие конвективной облачности от ее возникновения до распада. В общей модели [3-5] рассматривается конвективное облако, возникающее и растущее при наличии неустойчивости стратификации атмосферы от единичного начального температурного возмущения в нижнем слое. При этом режим спонтанной конвекции (параметры которой определяются не величиной возмущения, а стратификацией атмосферы) реализуется в достаточно небольшом диапазоне значений этой величины.

При моделировании развития поля взаимодействующих конвективных облаков проводились расчеты при инициализации конвекции не одним, а несколькими начальными возмущениями. Результаты расчетов для случая одного и двух аналогичных возмущений расположенных между собой на расстоянии 2, 3, 4 и 7 характерных радиусов, определяющих их размер, приведены на рисунках 4 и 5. При расстоянии 4 и 7 радиусов наблюдается раздельное развитие двух

конвективных облаков. При этом, взаимодействуя, они ослабляются и не дают удвоенного количества выпавших осадков. При расстоянии 2 радиуса возмущения практически сливаются в одно с удвоенной амплитудой. При этом модель переходит в режим моделирования вынужденной конвекции: облако формируется существенно раньше и количество выпавших осадков увеличивается более чем в 2.5 раза. При расстоянии 3 радиуса взаимодействие более сложное, в этом случае возникает вторичное развитие конвективного облака с дополнительным увеличением выпадающих осадков.

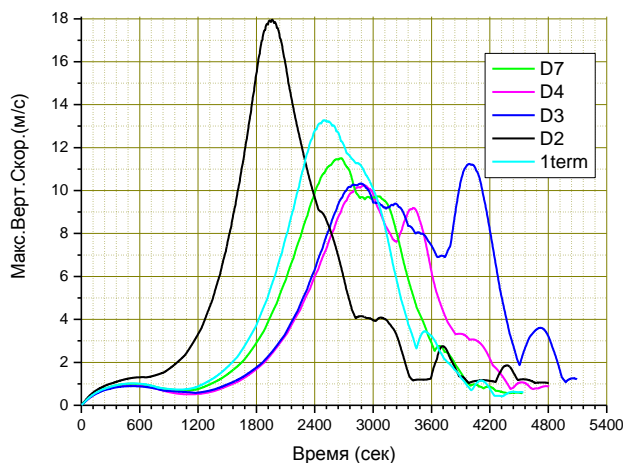


Рис. 4. Эволюция максимума вертикальной скорости при одном начальном возмущении (голубые линии) и двух таких же, расположенных на расстоянии двух (черные), трех (синие), четырех (лиловые) и семи характерных радиусов.

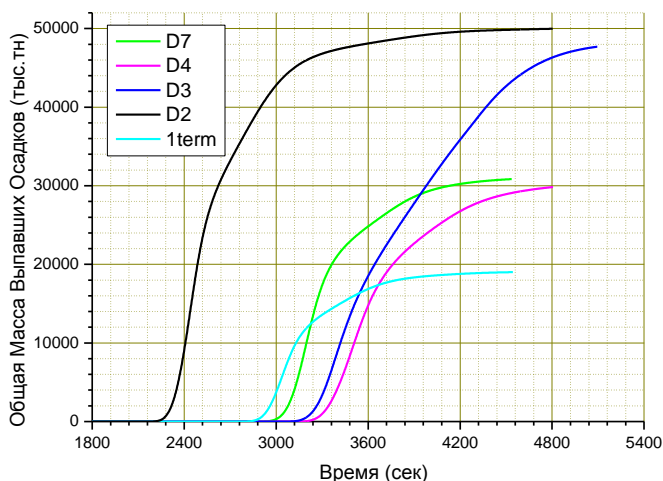


Рис. 5. Эволюция общей массы выпавших осадков при одном начальном возмущении (голубые линии) и двух таких же, расположенных на расстоянии двух (черные), трех (синие), четырех (лиловые) и семи характерных радиусов.

## **Выводы**

Проведенные численные эксперименты показали, что наиболее пригодными для увеличения общего количества осадков при АВ являются конвективные облака, формирующиеся при больших концентрациях мелкодисперсных фоновых ОЯК, что характерно для континентальных условий или при задымлении. Помимо аэрозольного состояния атмосферы на развитие конвективных облаков и эффективность АВ на них существенное влияние оказывают термические характеристики подстилающей поверхности.

## ***Список литературы***

1. Khain A., Pokrovsky A., Pinsky M., Seifert A., Phillips V. Simulation of Effects of Atmospheric Aerosols on Deep Turbulent Convective Clouds Using a Spectral Microphysics Mixed-Phase Cumulus Cloud Model. Part I: Model Description and Possible Applications, J.Atmos.Sci., 2004, v.69,2963-2982.
2. Khain A. P., Benmoshe N., And Pokrovsky A.. Factors Determining the Impact of Aerosols on Surface Precipitation from Clouds: An Attempt at Classification, J.Atmos.Sci., 2008, v.65, 1721-1748.
3. Han Ji-Young And Baik Jong-Jin, Khain Alexander P. A Numerical Study of Urban Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation. J.Atmos.Sci., 2012, v.69, 506-520.
4. 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. Концепция разработки численной нестационарной трехмерной модели эволюции осадкообразующего конвективного облака в естественных условиях и при активных воздействиях.// Труды ГГО. – 2016. – Вып. 582. с 7-44.
5. Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака.//Труды ГГО. – 2016. – Вып. 582. с 45-91.
6. Владимиров С. А. Численное моделирование воздействия на процесс образования осадков в конвективных облаках с помощью засева гигроскопическими аэрозолями.// Метеорология и гидрология, – 2005, №1, – С.58– 69.
7. Владимиров С. А. Численное моделирование с параметризацией микрофизических процессов воздействий на осадки конвективного облака.//Труды II международной конференции «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата» Ставрополь 22-25 сентября 2015г.



8. Владимиров С.А. Исследование влияния атмосферных аэрозолей (ОЯК) на развитие конвективного облака с использованием численных моделей.//Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Вопросы физики облаков. Атмосферные аэрозоли, активные воздействия. Сборник статей памяти Н.О. Плауде., 2015 - С. 128-139.

9. Владимиров С. А., Пастушков Р. С. Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трехмерное численное моделирование.//Труды ГГО. – 2016. – Вып. 582. с. 116-127.

## РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ УРАВНЕНИЯ СМОЛУХОВСКОГО

Гаева З.С. <sup>1</sup>, Гасников А.В. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

<sup>2</sup> ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», г. Долгопрудный, МО.

Среди микрофизических процессов, влияющих на формирование частиц осадков в облаках, коагуляция играет важнейшую роль. Наибольшее распространение получило исследование коагуляционных процессов на основе уравнения Смолуховского (кинетическое уравнение пространственно-однородной коагуляции) [1,2]:

$$\frac{\partial f(t, m)}{\partial t} = - \int_0^{+\infty} K_{11}(m, m') f(t, m) f(t, m') dm' + \frac{1}{2} \int_0^m K_{11}(m-m', m') f(t, m-m') f(t, m') dm' \quad (1)$$

$$f(0, m) = f_0(m), \quad t \geq 0, m \geq 0. \quad (2)$$

Считается, что указанное уравнение моделирует процессы коагуляции, протекающие, например, в облаке (коагуляция капель, агрегация ледяных кристаллов, аккреция капель и кристаллов), в коллоидных растворах [3–5]. Функция распределения капель по массе:  $f(m, t)$  определяется так, что  $f(m, t)dm$  описывает среднюю концентрацию частиц системы, массы которых в момент  $t$  лежат в интервале  $(m, m + dm)$ . Ядро  $K_{11}(m, m')$  – известная функция слияния частиц массами  $m$  и  $m'$ , а ее численное значение пропорционально частоте слияний таких частиц в единице объема системы, т.е. величине, обратной среднему времени жизни частиц с указанными массами. Конкретный вид ядра получается на основе анализа эмпирического материала. Условие (2) задает функцию распределения частиц в начальный

момент. Настоящую задачу следует рассматривать как часть большой общей задачи описания коагулирующих систем, которая далека от завершения и непосредственно связана с нуждами человечества, например, перераспределение осадков, осаждение облаков и туманов в окрестности аэропортов, предотвращение града.

Задача нахождения решения уравнения Смолуховского аналогична по своей сложности задаче нахождения решения уравнения Больцмана в газовой динамике. Поэтому зачастую проблемы кинетической теории газов и кинетической теории коагуляции являются тесно связанными.

Численно решать задачу Коши (1), (2) можно как конечно-разностными методами, так и вариационными [5,7,9]. Решение кинетических уравнений, сопряжено с большими трудностями, обусловленными сложной структурой коэффициента коагуляции и интегрального оператора.

При использовании конечно-разностной схемы мы имеем, что коэффициент пропорциональности между временем, на котором мы следим за облаком, и временем счета без распараллеливания имеет порядок  $10^9$ . А при распараллеливании - в  $N$  раз меньше, где  $N$  – число процессоров. Область интегрирования в пространственно-однородном случае  $\sim (m' \approx 10) * (m \approx 10) * T$ , шаги  $\sim 0,01 * 0,01 * 0,01$ , на каждом шаге  $\sim 10$  операций с плавающей запятой (flop), т.е. порядка  $T * 10^9$  flop операций. В случае двумерной и трехмерной задачи число операций возрастет в зависимости от шага по пространственным координатам на три и более порядка в зависимости от шагов по пространственной сетке.

Для решения задачи (1), (2) будем использовать метод Галеркина. С помощью метода Галеркина, за счет удачного выбора полной ортонормированной системы функций, можно значительно сократить объем вычислений. При решении кинетического уравнения в качестве такой системы используется система функций Дмитриева [9].

Пусть  $\{\varphi_k(m) | 0 \leq m \leq \infty, k = 1, 2, \dots, \infty\}$  – полная ортонормированная система функций в  $L_2[0, \infty]$ , полученная при ортогонализации (по Грамму–Шмидту) системы функций  $\{e^{-0,5km}, k = 1, 2, \dots, \infty\}$ , т.е. система функций Дмитриева. Будем искать решение в виде:

$$f(t, m) = \sum_{k=1}^n a_k(m) \varphi_k(t). \quad (3)$$

Подставив (3) в (1) и скалярно умножив обе части полученной системы на первые  $n$  функций Дмитриева, получим систему из  $n$  обыкновенных дифференциальных уравнений относительно коэффициентов Галеркина:

$$\frac{da_k(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ijk} a_i(t) a_j(t), \quad (4)$$

где

$$C_{ijk} = \int_0^{\infty} \varphi_k(m) \left( \int_0^{\infty} K_{11}(m, m') \varphi_i(m) \varphi_j(m') dm \right) dm = \int_0^{\infty} I(\varphi_i, \varphi_j) \varphi_k(m) dm \quad (5)$$

с начальными данными:

$$a_k(0) = \int_0^{\infty} f(0, m) \varphi_k(m) dm. \quad (6)$$

Полученную задачу можно разбить на три отдельные подзадачи, которые могут решаться независимо:

- 1) вычисление  $n(n + 1)/2$  чисел – элементов нижней треугольной матрицы перехода  $G$  от экспоненциальной системы функций к системе функций Дмитриева [9];
- 2) вычисление  $n^3$  коэффициентов  $C_{ijk}$  по формуле (5). Подчеркнем их независимость от времени, а потому их надо вычислить всего лишь один раз;
- 3) решение (например, с помощью простейшей, явной схемы Эйлера) задачи Коши (4), (6) для системы из  $n$  обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ).

Из вышеприведенного разбиения на подзадачи становится ясно основное преимущество использования метода Галеркина по сравнению с разностной схемой. Решив сначала 1- и 2 подзадачи, мы можем решить СОДУ (4), (6), в которой коэффициент пропорциональности между временем, на котором мы следим за облаком, и временем счета без распараллеливания имеет порядок  $(1/h_t)n^2 = 100 n^2$ . А при распараллеливании, в  $N$  раз меньше, где  $N$  – число процессоров. Перейдем к распараллеливанию каждой из подзадач. Распараллеливать мы будем на MPI под Microsoft Visual C++ 6.0. Подзадача 1) распараллеливается на  $n$  процессорах очевидным образом, поскольку есть явные формулы для элементов матрицы  $G$  [9]. Действительно,  $k$ -й процесс считает  $k$  чисел, помещает их в массив длины  $n$ , а оставшимся элементам массива он присваивает 0 значение. Затем каждый процесс вызывает MPI\_Allgather [10], таким образом, каждый из  $n$  процессов знает все  $n(n + 1)/2$  чисел. Следует отметить, что при использовании MPI\_Allgather и некоторых других функций параллельной библиотеки, в силу их специфики, необходимо знать, как в C++ хранятся массивы. К примеру, если у нас двумерный массив, то сначала в памяти размещается его первая строка, потом вторая и т.д.

Подзадача 2) самая сложная с точки зрения объема вычислений, и, следовательно, может занимать много времени, если требуется хорошая точность. В этой связи ее имеет

смысл запускать на максимально возможном количестве процессов. При фиксированном  $n$  синхронизационная накладка [10], связанная с обменом данными между процессами, растет значительно медленней с ростом числа процессов, чем время, которое экономиться за счет роста числа процессов. Это обусловлено огромным объемом вычислений, которое приходится на один процесс (следует сравнить с подзадачей 3) ниже). Таким образом, увеличив число процессов, мы увеличим точность, оставаясь в тех же временных рамках. Задача 2) считалась на  $n^2$  процессорах. Каждый  $(i, j)$ -й процесс, в декартовой топологии [10], вычисляет  $n$  коэффициентов  $C_{ijk}$   $k = 1, \dots, n$ , а затем вызывает MPI\_Allgather, таким образом, каждый из  $n^2$  процессов знает целиком трехмерный массив  $C_{ijk}$ .

Подзадача 3) естественным образом распараллеливается на  $n$  процессорах. Сперва  $k$ -й процесс считает  $a_k(0)$  по формуле (5). Затем процессы обмениваются  $a_k(0)$  и, в результате, каждый процесс знает  $n$ -мерный вектор  $\bar{a}(0)$ . Заменяя в (4) производную по времени конечной разностью, т.е. используя схему Эйлера, получим:

$$a((i+1)h) = a(ih) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ijk} a_i(ih) a_j(ih). \quad (7)$$

Дальше будем действовать по индукции (база у нас уже есть). Предположим, что на шаге  $i + 1$  каждый процесс знает вектор  $\bar{a}(ih)$ , тогда  $k$ -й процесс сможет посчитать по формуле (7) значения  $a_k((i+1)h)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . Затем процессы обмениваются значениями  $a_k((i+1)h)$ , и в результате, каждый процесс знает  $n$ -мерный вектор  $\bar{a}((i+1)h)$ . Заметим, что при такой организации распараллеливания отсутствует синхронизационная накладка, поскольку все процессы выполняют практически один и тот же объем вычислений. Поэтому достаточно просто синхронизировать моменты начала выполнения подзадачи 3) у всех процессов, что можно сделать с помощью MPI\_Barrier [10]. Возникает естественный вопрос: почему бы не попытаться запустить 3-ю подзадачу на большем количестве процессов? Ответ достаточно прост: на каждом шаге каждый процесс делает  $n^2$  арифметических операций с double и отправляет  $n$  сообщений. Поскольку при современных мощностях  $n^2 < 700$  операций выполняются практически мгновенно, то временные затраты на посылку сообщений становятся сопоставимы со временем выполнения операций. Поэтому, значительно уменьшать число операций выполняемых одним процессом за счет увеличения числа процессов не имеет смысла, поскольку время при этом экономиться не будет, т.к. будет расти синхронизационная накладка. Как правило,  $n \sim 5-25$  (число членов в ряде Галеркина), поэтому  $n^2$  процессоров есть в нашем распоряжении. У нас был доступ к суперкомпьютеру «МВС 1000М», содержащему порядка 700 процессоров (пиковая производительность 1012 flops/s, реальная на порядок ниже), <http://www.jscc.ru>.

Теперь остановимся поподробнее на некоторых деталях реализации решения задачи. При интегрировании (5),(6) подынтегральные выражения имеют экспоненциальное убывание на бесконечности (точнее убывание вида  $\sim e^{-0,5x}$ ), поэтому с хорошей точностью можно ограничиться интегрированием от 0 до  $Mp \sim 20-30$ , поскольку коэффициент при этой экспоненте, как показывает расчет, имеет, самое большое, порядок 103. При численном интегрировании нами использовалась формула Симпсона, которая на отрезке интегрирования  $[a, b]$  дает точность:

$$|J - \tilde{J}| \leq \frac{1}{2880} (b-a) M_4 h^4, \quad (8)$$

где  $M_4$  – максимальное по модулю на отрезке  $[a, b]$  значение 4-й производной подынтегрального выражения [11]. Так как  $b - a < 30$  и подынтегральное выражение достаточно гладкое (в силу экспоненциальных множителей и равномерно гладкое на  $[0, +\infty]$ ), то из (8) следует, что брать шаг интегрирования  $h$  меньше чем 0,01 не имеет смысла. В результате, при таком вычислении интегралов, подзадачи 1) и 2) считаются на 25 процессорах Intel Pentium IV порядка 5–10 с ( $h = 0,1$ ). Подзадачи 1)–3) решались в одной программе. В связи с этим возникла необходимость создать новый коммуникатор [10]. Один и тот же процесс имел разные ранги в разных коммуникаторах. Также потребовалось широко распространять данные от одного (корневого) процесса всем остальным процессам в этом коммуникаторе MPI\_Bcast [10]. Для вычисления интегралов были созданы две универсальные функции, которые получают в качестве одного из аргументов ссылку на функцию – подынтегральное выражение.

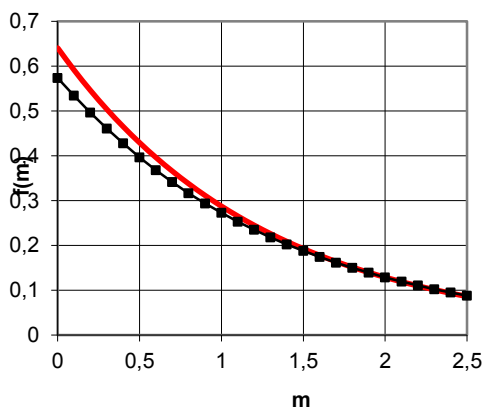


Рис. 1 ( $t = 0.5$ )

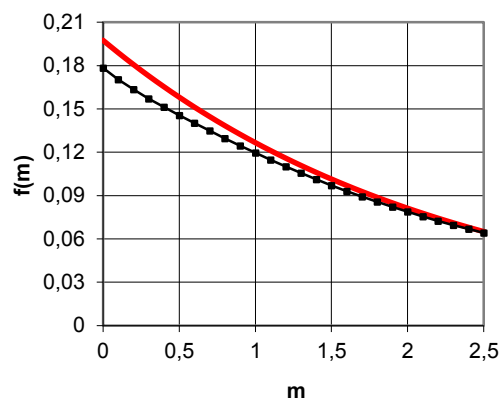


Рис. 2 ( $t = 2.5$ )

На рис.1, 2 представлены результаты решения задачи (1), (2) для моментов времени  $t = 0,5$  и  $t = 2,5$ , когда начальная функция распределения  $f(0, m) = e^{-m}$ ,  $t \geq 0, m \geq 0$ , а ядро  $K_{11}(m, m') \equiv 1$ . Для этого модельного случая известно точное решение, ему соответствует

сплошная линия, а приближенному - линия с точками. Обратим внимание на то, что в ряде Галеркина было взято всего лишь  $n = 5$  слагаемых, а шаг интегрирования равнялся 0.1. Из графиков можно сделать вывод о хорошей сходимости приближенного решения к точному решению.

В заключение отметим, что использование описанного выше подхода для решения ряда систем интегро-дифференциальных уравнений позволяет существенно сократить время расчета, по сравнению с использованием распараллеленных разностных схем. Это достигается благодаря тому, что:

- 1) при удачном выборе базисной системы функций можно ограничиться нахождением лишь небольшого количества слагаемых в ряде Галеркина, как правило, 10 слагаемых достаточно;
- 2) коэффициент пропорциональности между временем, на котором мы «следим» за облаком, и временем счета, при использовании метода Галеркина, оказывается на несколько порядков меньше, чем коэффициент пропорциональности соответствующий разностному методу;
- 3) приведенное выше распараллеливание не имеет синхронизационных накладок. Исследование сходимости ряда Галеркина, т.е. проверка условия устойчивости галеркинской аппроксимации интегро-дифференциального оператора [7], для (1), (2) сделана в работе [9] с использованием проблемы моментов Чебышева–Маркова–Крейна.

Мы выражаем благодарность к.ф.-м.н. доценту Н.Н. Оленеву и д.ф.-м.н. профессору А.А. Шананину за оказанную нам помощь при выполнении этой работы.

### ***Список литературы***

1. Волощук В.М., Седунов Ю.С. Процессы коагуляции в дисперсных системах. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
2. Berry E.X. Cloud droplet growth by collection, Journal of Atmospheric Sciences. V. 24. 1967. P. 278–286.
3. Степанов А.С. К выводу уравнения коагуляции // Тр. ИЭМ. Вып. 23. 1971. С. 3–16.
4. Смолуховский М. Опыт математической теории кинетики коагуляции коллоидных растворов. В кн.: Коагуляция коллоидов. М.: ОНТИ, 1936. С. 7–36.
5. Галкин В.А. Уравнение Смолуховского. М.: Физматлит, 2000. 336 с.
6. Гаева З.С., Шананин А.А. Численный метод решения задачи управления микроструктурой градового облака // Матем. модел. 2004. Т. 16, № 12. С. 69–84.
7. Треногин В.А. Функциональный анализ. М.: Физматлит, 2002, гл. VII и §38.
8. <http://www.computational-battery.org/Maskinvar/Flops.html>, <http://www.spec.org>, <http://www.cs.utk.edu/~rwhaley/ATLAS/x86.html>.
9. Гаева З.С., Шананин А.А. Проблемы моментов Маркова–Чебышева исследование галеркинских приближений в одной задаче агрегации кристаллов // Матем. модел. 1995. Т. 7, №9. С.35-54.

10. Оленев Н.Н. Основы параллельного программирования в системе MPI. ВЦ РАН, 2005. Сб. лабораторных работ <http://www.ccas.ru/mmes/educat/lab04k/>.
11. Косарев В.И. 12 лекций по вычислительной математике. М.: МФТИ, 2000. 81 с.

## **ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ КОАГУЛЯЦИИ ДЛЯ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА СМЕШАННОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСКРЕТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ ЧАСТИЦ**

**Шаповалов А.В., Шериева М.А., Ковалев Е.А., Шереметьев Р.В.**

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Наиболее полное описание микрофизических процессов возможно с помощью детальных интегро-дифференциальных уравнений, решаемых лишь численно. При этом математическое моделирование микрофизических процессов в облаках требует существенных затрат машинного времени. Микрофизический блок численной модели облака [1] описывает процессы коагуляции капель с каплями, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками.

В данной работе приведены методика и результаты решения уравнений для функций распределения по массам капель  $f_1(x,y,z,m,t)$  и ледяных частиц  $f_2(x,y,z,m,t)$ . Разработана усовершенствованная численная схема решения уравнений коагуляции. Были проведены расчеты микрофизических процессов на интервале времени 25 мин. Исследовано изменение со временем спектров капель и ледяных частиц в облаке.

Взаимодействие частиц под влиянием электрических сил существенным образом меняет эффективность столкновения частиц, особенно мелких [3,4]. В очень сильных полях практически исчезает область слабой коагуляции. Авторами разработаны алгоритмы учета электрической коагуляции частиц при моделировании микрофизических процессов.

Система уравнений для функций распределения по массам капель  $f_1(\vec{r}, m, t)$  и ледяных частиц  $f_2(\vec{r}, m, t)$  имеет следующий вид [1,2]:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + v \frac{\partial f_1}{\partial y} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} = \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{KD} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{KT} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{AK} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{DP} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_1 + I_1, \quad (1)$$

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

где  $\Delta' = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z}$ ,  $V_1(m)$ ,  $V_2(m)$  - установившиеся скорости падения жид-

ких и твердых частиц;  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{KD}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{KG}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{AK}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{DP}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3$  - изменения функции рас-

пределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, ак-

креции 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 за-

мерзания капель.

Для системы уравнений (1) используются следующие начальные и граничные условия:

$$f_1(\vec{r}, m, 0) = f_2(\vec{r}, m, 0) = 0, \quad (2)$$

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

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } z=L_z, \quad (3)$$

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

Коэффициент турбулентной диффузии рассчитывается по формуле:

$$K = C \cdot L_T^2 \left[ \sum \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

здесь  $C$  - безразмерная константа,  $L_T$  - характерный масштаб турбулентности.

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

$$\left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_{KG} = -f_1(\vec{r}, m, t) \int_0^\infty \beta_1(m, m') \cdot f_1(\vec{r}, m', t) dm' + \\ + \int_0^{m/2} f_1(\vec{r}, m - m', t) \beta_1(m, m') f_1(\vec{r}, m', t) dm', \quad (5)$$

где  $\beta_1(m, m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_1(m) - V_1(m')| \cdot E_1(m, m')$ ;  $r(m)$  и  $r(m')$  - радиусы сталкивающихся частиц;  $V_1(m)$  и  $V_1(m')$  - их скорости падения;  $E_1(m, m')$  - коэффициент захвата для капель.



Линейный коэффициент столкновений для капель радиусом  $r < 400$  мкм рассчитывается по аппроксимационной формуле:

$$E_1 = 1 + P_1 - A_1 \cdot P_1^{-C_1} - B_1 \cdot (1 - P_1)^{-D_1} \quad (6)$$

где  $P_1 = r/r'$ ;  $A_1 = 27,2 r^{-1,645}$ ;  $B_1 = 58,5 r^{-1,9}$ ;

$C_1 = (15,24/r)^4 + 1,13$ ;  $D_1 = (16,65/r)^8 + 0,00393 r' + 0,98$ .

Для капель с большим радиусом ( $r_i > 400$  мкм) коэффициент столкновения определяется по предельной формуле  $E_1 = 1 + P_1$ .

Расчет взаимодействия капель и кристаллов проводится на основе следующих соотношений:

$$\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{AK} = -f_1(\vec{r}, m, t) \int_0^{\infty} \beta_2(m, m') \cdot f_2(\vec{r}, m', t) dm', \quad (7)$$

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

$$+ \int_0^m \beta_2(m, m - m') f_2(\vec{r}, m - m', t) f_1(\vec{r}, m', t) dm',$$

где  $\beta_2(m, m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_1(m) - V_2(m')| \cdot E_2(m, m')$ ,  $E_2$  – коэффициент захвата для капель и кристаллов. При этом предположено, что столкновение кристаллов с каплями приводит к замерзанию последних.

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

Дискретные значения масс облачных частиц задавались следующим образом:

$m_1 = 2,5 \cdot 10^{-10}$  (г),  $m_{n+1} = 1,414 \cdot m_n$ ,  $n \in [1:62]$ . Для кристаллов использована 81 категория масс.

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

$$M = \int_0^{\infty} mf(m)dm = const. \quad (9)$$

Интегрирование уравнения (5) проводилось на интервале времени  $t = [0; 20]$  мин с шагом  $\Delta t = 10$  с.

Начальное распределение капель по массам (размерам) было задано по формуле:

$$f(r) = A \cdot r^2 \cdot \exp(-b \cdot r), \quad (10)$$

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

Изменение концентрации частиц  $N = \int_0^{\infty} f(m) dm$  и их интегральной массы (9) со време-

нем представлены в таблице 1. Распределение водности капель по градациям массы (размеров) приведено на рис.1 для двух моментов времени ( $t_1=0$ ,  $t_2=20$  мин).

Таблица 1

**Результаты тестовых расчетов уравнения коагуляции капель**

t (с)	N·10 <sup>8</sup> (м <sup>-3</sup> )	M (г)	t (с)	N·10 <sup>8</sup> (м <sup>-3</sup> )	M (г)	t (с)	N·10 <sup>8</sup> (м <sup>-3</sup> )	M (г)	t (с)	N·10 <sup>8</sup> (м <sup>-3</sup> )	M (г)
10	4,43	0,707	310	3,92	0,708	610	3,43	0,705	910	2,95	0,701
20	4,41	0,707	320	3,90	0,708	620	3,41	0,705	920	2,93	0,701
30	4,39	0,707	330	3,89	0,708	630	3,40	0,705	930	2,92	0,701
40	4,38	0,708	340	3,87	0,708	640	3,38	0,705	940	2,90	0,701
50	4,36	0,708	350	3,85	0,708	650	3,36	0,705	950	2,89	0,700
60	4,34	0,708	360	3,84	0,707	660	3,35	0,704	960	2,87	0,700
70	4,33	0,708	370	3,82	0,707	670	3,33	0,704	970	2,86	0,700
80	4,31	0,708	380	3,80	0,707	680	3,31	0,704	980	2,84	0,700
90	4,29	0,708	390	3,79	0,707	690	3,30	0,704	990	2,82	6,998
100	4,27	0,708	400	3,77	0,707	700	3,28	0,704	1000	2,81	6,997
110	4,26	0,708	410	3,76	0,707	710	3,27	0,704	1010	2,79	6,995
120	4,24	0,708	420	3,74	0,707	720	3,25	0,704	1020	2,78	6,994
130	4,22	0,708	430	3,72	0,707	730	3,23	0,704	1030	2,76	6,992
140	4,21	0,708	440	3,71	0,707	740	3,22	0,703	1040	2,75	6,991
150	4,19	0,708	450	3,69	0,707	750	3,20	0,703	1050	2,73	6,989
160	4,17	0,708	460	3,67	0,707	760	3,19	0,703	1060	2,72	6,988
170	4,16	0,708	470	3,66	0,707	770	3,17	0,703	1070	2,70	6,986
180	4,14	0,708	480	3,64	0,706	780	3,15	0,703	1080	2,69	6,985
190	4,12	0,708	490	3,62	0,706	790	3,14	0,703	1090	2,67	6,983
200	4,11	0,708	500	3,61	0,706	800	3,12	0,703	1100	2,66	6,982
210	4,09	0,708	510	3,59	0,706	810	3,11	0,702	1110	2,64	6,980
220	4,07	0,708	520	3,57	0,706	820	3,09	0,702	1120	2,63	6,979
230	4,06	0,708	530	3,56	0,706	830	3,08	0,702	1130	2,61	6,977
240	4,04	0,708	540	3,54	0,706	840	3,06	0,702	1140	2,59	6,976
250	4,02	0,708	550	3,53	0,706	850	3,04	0,702	1150	2,58	6,975
260	4,01	0,708	560	3,51	0,706	860	3,03	0,702	1160	2,56	6,973

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

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

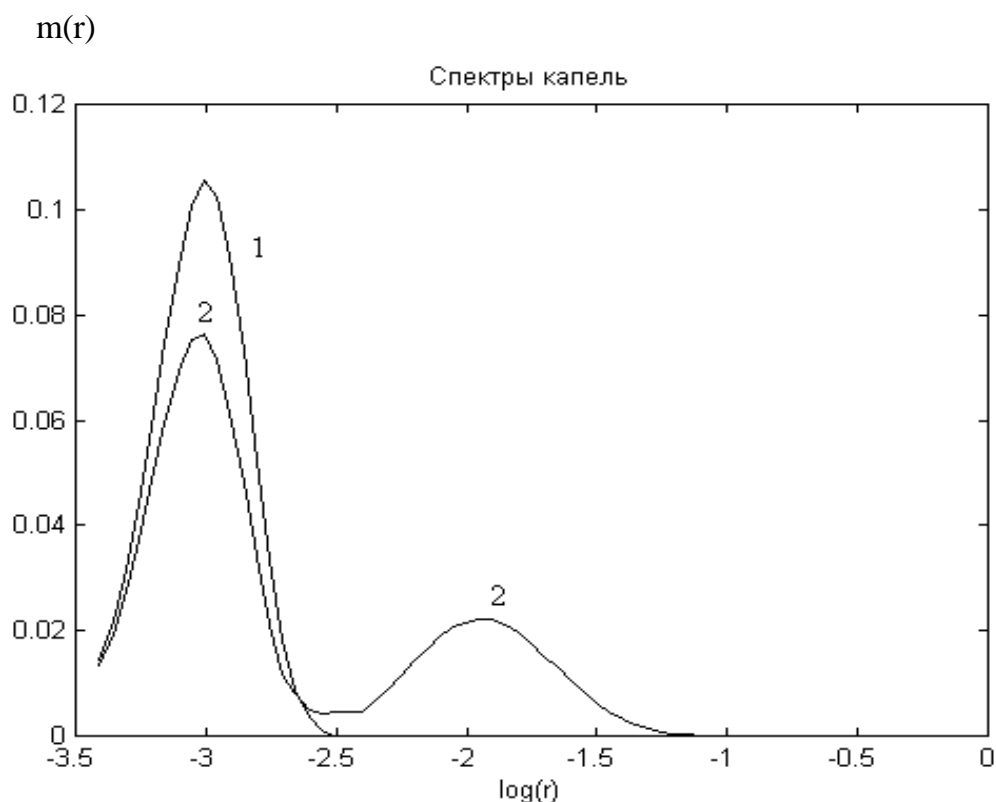


Рис.1. Распределение водности по интервалам размеров капель для двух моментов времени  $t_1=0$  (кривая 1) и  $t_2=20$  мин (кривая 2). По оси абсцисс отложен радиус капель в сантиметрах в логарифмическом масштабе, по оси ординат – водность капель ( $\gamma$ ) в интервале размеров  $r \div r+dr$ .

Вопрос о спектрах облачных частиц и частиц осадков в различных частях облака, их концентрации, интегральной водности представляет большой интерес [5]. Поэтому нами исследовались спектры капель и ледяных частиц в последовательные моменты времени и на разных высотных уровнях. На рис.2-6 приведены спектры жидких и твердых частиц в моменты времени  $t=5, 10, 15, 20$  и  $25$  мин в облаке на уровне с температурой воздуха  $-10$  °С.

Спектры вычислялись по уравнениям микрофизики (1)-(8) с учетом замерзания капель и взаимодействия капель и кристаллов. Ледяные частицы появляются вследствие замерзания крупных капель (рис.3). Далее происходит быстрый рост ледяных кристаллов за счет захвата капель. Эффективный радиус кристаллов больше, чем у капель, кроме того, при столкновениях капель с кристаллами, последние замерзают.

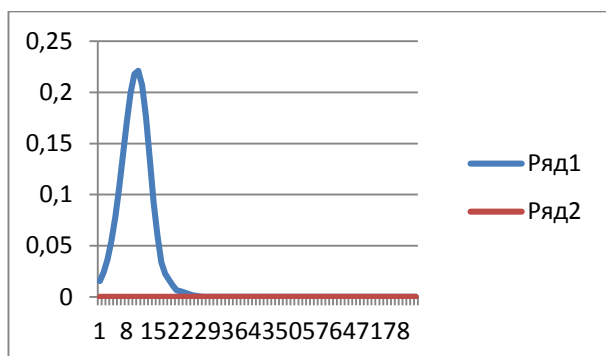


Рис.2 - Распределение капель в момент времени  $t=5$  мин. По оси абсцисс отложены номера интервалов масс частиц, по оси ординат – водность в интервалах.

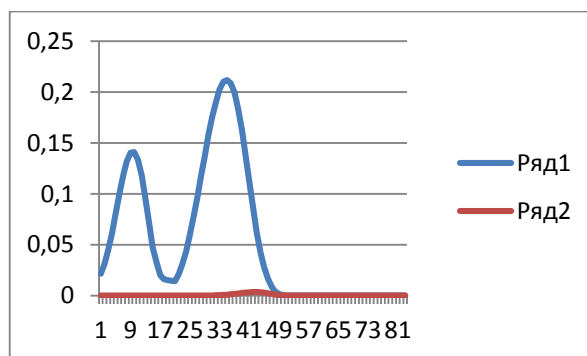


Рис.3 - Распределение капель и кристаллов в момент времени  $t=10$  мин

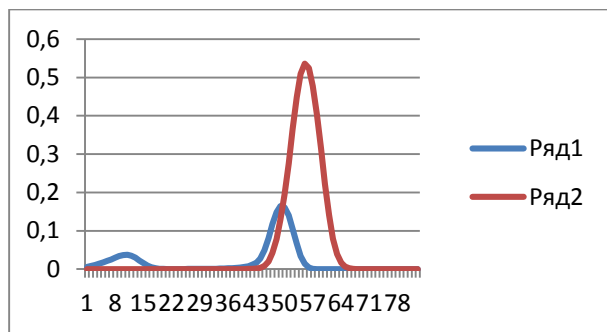


Рис.4 - Распределение капель и кристаллов в момент времени  $t=15$  мин

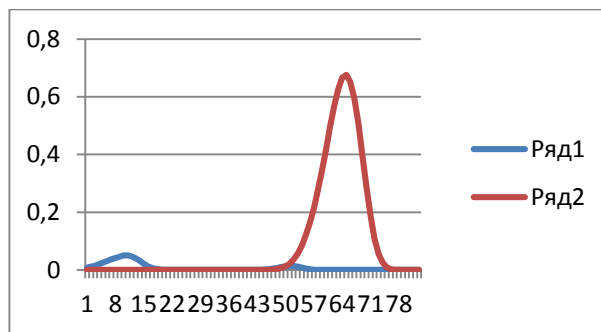


Рис.5 - Распределение капель и кристаллов в момент времени  $t=20$  мин

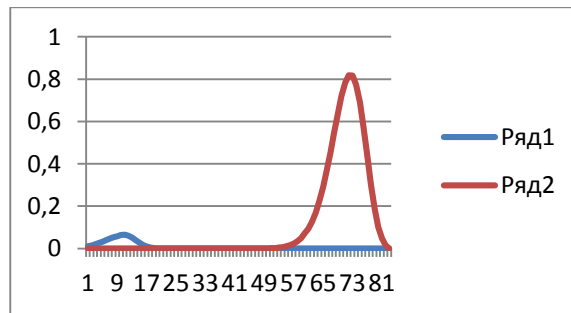


Рис.6 - Распределение капель и кристаллов в момент времени  $t=25$  мин

Для учета электрической коагуляции коэффициенты взаимодействия частиц различных размеров  $E_1(m,m')$  в (5)-(8) умножаются на корректирующие множители  $e_{\text{корр}}(E_{\text{эл}}, m, m', q_{\text{эл}}, q_{\text{эл}}')$ , которые зависят от напряженности электростатического поля  $E_{\text{эл}}$ , размеров частиц  $m, m'$  и зарядов на частицах  $q_{\text{эл}}, q_{\text{эл}}'$  [4,5].

### Выводы

Модели с детальным учетом микрофизических процессов позволяют исследовать формирование микроструктурных характеристик облаков, образование осадков и другое. В большинстве таких моделей для описания микрофизических процессов используются кинетические уравнения для функций распределения частиц по массам (размерам).

Использование детальных микрофизических уравнений в моделях облаков, несмотря на сложность реализации, является предпочтительным, т.к., в этом случае изменение микроструктурных характеристик со временем описывается строгими физическими формулами. При использовании малого количества классов частиц в моделях с параметризованной микрофизикой (например, пяти) теряются индивидуальные физические свойства капель и ледяных кристаллов различных размеров в облаке. Теряется нелинейность, которая свойственна процессам осадкообразования. Следует также отметить, что коэффициент гравитационной коагуляции является сложной функцией, зависящей от размеров взаимодействующих частиц, и замена его одним числом представляет собой грубое приближение.

Основные результаты работы заключаются в том, что: построены усовершенствованные численные схемы решения уравнений коагуляции, проведены расчеты микрофизических процессов, исследовано изменение со временем спектров капель и ледяных частиц в облаке. Для учета электрической коагуляции предложено коэффициенты взаимодействия частиц различных размеров корректировать умножением на коэффициенты, которые зависят от напряженности электростатического поля, размеров частиц и зарядов на них.

### *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. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Воростьянов В.И. Численное моделирование облаков. - М., 1984.-186 с.
3. Красногорская Н.В. Влияние электрических сил на коагуляцию частиц сравнимых размеров// ИАН СССР. ФАО, 1965. Т.1. - С. 339-345.
4. Левин Л.М. Электрическая коагуляция облачных капель// Тр. Эльбрусской высокогорной экспедиции, 1961, Т.2. – С. 5-42.
5. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака строение и физика образования. – Л., Гидрометеиздат, 1983.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НИЗКУЮ СЛОИСТООБРАЗНУЮ ОБЛАЧНОСТЬ И ТУМАНЫ

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

АНО «Агентство АТТЕХ», г. Москва

## 1. Введение

При проведении работ по активным воздействиям (АВ) на низкую облачность и туманы одной из важнейших задач является оценка эффекта воздействий при использовании различных средств и различными типами реагентов. Для решения данной задачи в АНО «Агентство АТТЕХ» были разработаны трёхмерные численные модели «Fog Seeding» и «Seeding», предназначенные для численного моделирования активных воздействий соответственно на переохлажденные туманы и низкую слоистообразную облачность с помощью наземных и самолётных аэрозольных генераторов.

В представленной работе приводятся краткое описание моделей «Fog Seeding», «Seeding» и полученные с их помощью результаты численных экспериментов по воздействию на переохлажденные туманы и низкую слоистообразную облачность при работе наземными аэрозольными генераторами.

## 2. Описание численных моделей

Численное моделирование активных воздействий выполнялось с помощью мезомасштабных трехмерных моделей, в которых учитывается рельеф местности. В моделях 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. Поля давления, температуры и влажности для свободной атмосферы определяются аналогичным образом.

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 [1]. 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 моделях характеристики атмосферного пограничного слоя рассчитываются на основе метода энергетического баланса [2]. В качестве исходных данных используются данные наземных метеорологических наблюдений. Высота пограничного слоя при различных

стратификация температуры определяется с помощью процедур, описанных в [1]. Вертикальные профили скорости, температуры и влажности, а также характеристики турбулентной диффузии в пограничном слое рассчитываются с применением теории подобия и эмпирических формул [1].

Модель «Fog Seeding» позволяет проводить численное моделирование эволюции тумана и его рассеяния при естественном развитии и активном воздействии с помощью стационарных и мобильных генераторов.

В модель «Fog Seeding» включено два вида частиц: капли тумана и кристаллы, образующиеся в результате активного воздействия. Эволюция тумана после активного воздействия описывается следующей системой уравнений:

1. Уравнение для изменения абсолютной влажности воздуха:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial(uq)}{\partial x} - \frac{\partial(vq)}{\partial y} - \frac{\partial(Wq)}{\partial z} + Q_q + F_q \quad (1)$$

где  $W$  – вертикальная скорость воздуха (м/с),  $u$  и  $v$  – горизонтальные составляющие скорости воздуха (м/с),  $q$  – абсолютная влажность воздуха (кг/м<sup>3</sup>),  $t$  – время (с),  $Q_q$  – источники и стоки влажности (кг/м<sup>3</sup>·с),  $F_q$  – изменение влажности вследствие турбулентного переноса (кг/м<sup>3</sup>·с).

2. Уравнение для изменения водности тумана:

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = -\frac{\partial(uM_w)}{\partial x} - \frac{\partial(vM_w)}{\partial y} - \frac{\partial(WM_w)}{\partial z} + Q_w + F_w \quad (2)$$

где  $M_w$  – водность (кг/м<sup>3</sup>),  $t$  – время (с),  $Q_w$  – источники и стоки водности (кг/м<sup>3</sup>·с),  $F_w$  – изменение водности вследствие турбулентного переноса (кг/м<sup>3</sup>·с).

3. Уравнение для изменения концентрации ледяных кристаллов, образовавшихся в результате воздействия:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\frac{\partial(uN_i)}{\partial x} - \frac{\partial(vN_i)}{\partial y} - \frac{\partial(WN_i)}{\partial z} + \frac{\partial(v_N N_i)}{\partial z} + Q_N + F_N \quad (3)$$

где  $N_i$  – концентрация ледяных кристаллов (1/м<sup>3</sup>),  $t$  – время (с),  $v_N$  – средняя скорость падения кристаллов (м/с),  $Q_N$  – источники и стоки концентрации кристаллов (1/м<sup>3</sup>·с),  $F_N$  – изменение концентрации кристаллов вследствие турбулентного переноса (1/м<sup>3</sup>·с).

4. Уравнение для изменения массы ледяных кристаллов, образовавшихся в результате воздействия:

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = -\frac{\partial(uM_i)}{\partial x} - \frac{\partial(vM_i)}{\partial y} - \frac{\partial(WM_i)}{\partial z} + \frac{\partial(v_M M_i)}{\partial z} + Q_M + F_M \quad (4)$$

где  $M_i$  – общая масса ледяных кристаллов (кг/м<sup>3</sup>),  $t$  – время (с),  $v_M$  – среднemasсовая скорость падения кристаллов (м/с),  $Q_M$  – источники и стоки массы кристаллов (кг/м<sup>3</sup>·с),  $F_M$  – изменение массы кристаллов вследствие турбулентного переноса (кг/м<sup>3</sup>·с).



В модель «Fog Seeding» включены микрофизические процессы конденсации и испарения капель тумана и диффузионного роста и испарения ледяных кристаллов, которые образуются при активном воздействии.

При расчете конденсации водяного пара на каплях тумана предполагается, что при повышении влажности воздуха выше насыщающей вся избыточная влага мгновенно конденсируется. Если влажность понижается ниже насыщающей, то мгновенно испаряется количество жидкокапельной влаги, необходимое для восстановления насыщающей влажности. Если жидкокапельной влаги недостаточно для достижения насыщающей влажности, то в этом месте капли тумана полностью испаряются.

В качестве исходных данных для моделирования служат данные о географическом положении области, о ее рельефе, свойствах подстилающей поверхности, радиозондовые данные, наземные метеорологические данные и начальные параметры тумана. В качестве начальных параметров тумана во вложенной области задаются: концентрация капель тумана, дальность видимости в тумане и высота верхней границы тумана. Моделирование начинается с расчета естественной эволюции тумана с целью достижения установившегося состояния тумана, при котором его характеристики согласуются с рассчитанными полями скорости ветра, температуры и влажности.

Модель «Seeding» позволяет проводить численное моделирование слоистообразных облаков и выпадающих из них осадков при естественном развитии и воздействии с помощью наземных генераторов йодистого серебра, пиропатронов и самолетных пиротехнических генераторов, самолетных азотных генераторов и твердой углекислоты.

Описание развития облаков и осадков в модели «Seeding» основывается на методах параметризации, представленных в работах [3, 4]. 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 [5]. Кристаллы зарождаются также при замерзании облачных капель согласно [6]. 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 «Seeding» 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 ледяных кристаллов и 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  $\text{CO}_2$  или азотным генератором, образующиеся ядра кристаллизации становятся непосредственным источником ледяных кристаллов. При моделировании тех воздействий, в которых генерируются частицы  $\text{AgI}$ , добавляется еще одно отдельное поле концентрации этих частиц и рассчитывается их перенос. При численном моделировании активных воздействий сначала рассчитывается естественное развитие слоистообразного облака и осадков. Момент начала воздействия выбирается по результатам расчета естественной эволюции облака и осадков, когда временные изменения их характеристик становятся относительно небольшими.

### 3. Результаты численных экспериментов

Численные эксперименты с помощью модели «Fog Seeding» были проведены для мобильных и стационарных генераторов аэрозолей жидкого азота.

В качестве иллюстрации на рис.1 приводятся некоторые результаты расчёта зон искусственного рассеяния при различных режимах воздействия на туман, сформировавшийся на трассе М5 "Урал" 10 февраля 2015 г. Точки 1 и 2 – мобильные азотные генераторы, движущиеся со скоростью 18 км/ч.

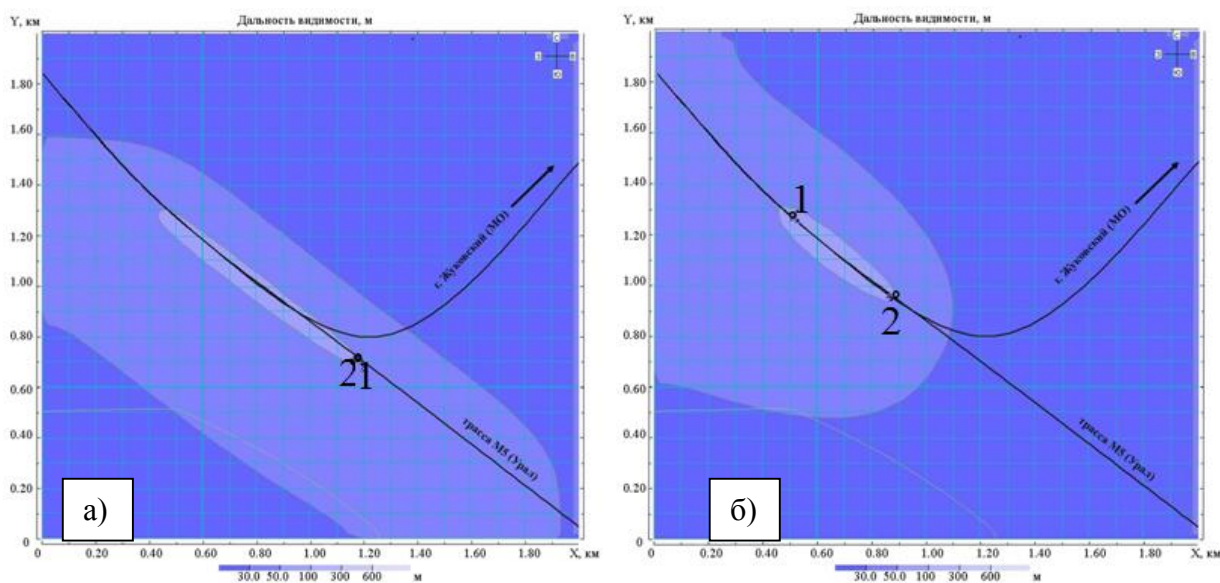


Рис.1. Изменение дальности видимости через 1 час после начала воздействия на туман двумя мобильными азотными генераторами 1 и 2, движущимися вместе в одном направлении (а) и движущимися навстречу друг другу (б).

Как видно из рисунка, результаты моделирования свидетельствуют о возможности увеличения дальности видимости в тумане с 30 до 150 метров путём искусственного воздействия на него мобильными генераторами жидкого азота.

На рис.2 приводятся результаты расчета зон искусственного рассеяния тумана, формирующегося в карьере, находящегося на территории Черногории. Воздействия проводились с помощью стационарных наземных генераторов аэрозолей жидкого азота, расположенных на дне карьера, имеющего следующие размеры: глубина – 60 м, верхняя часть – 1300 х 600 м, нижняя часть – 1100 х 400 м.

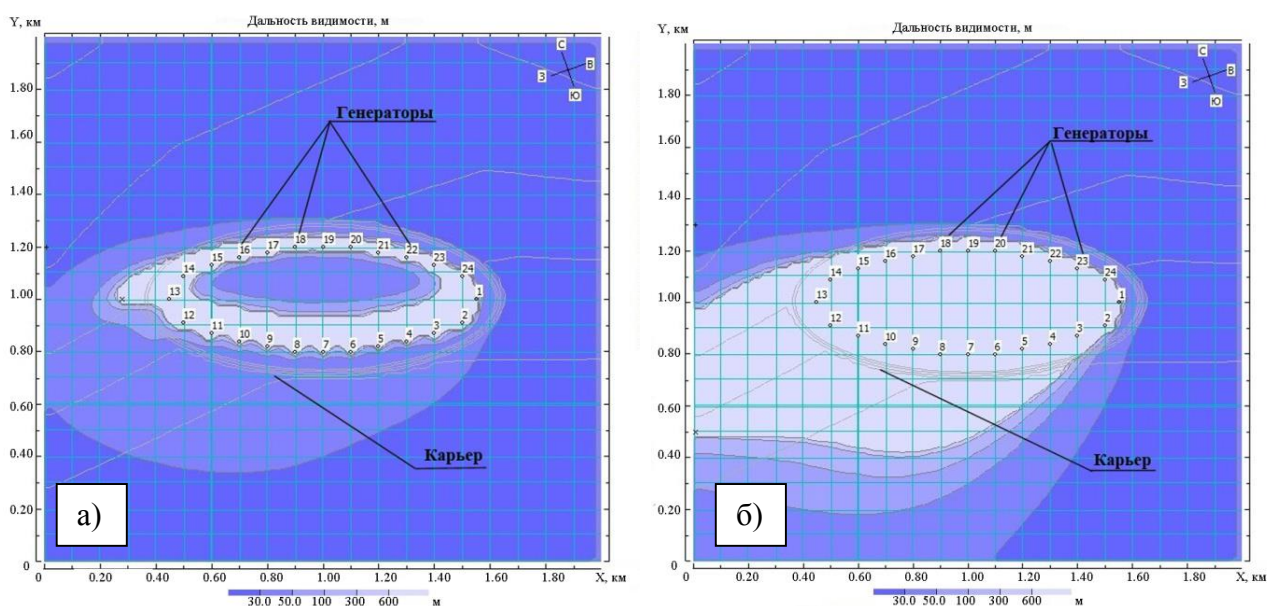


Рис. 2. Изменение дальности видимости при воздействии на туман 24 стационарными азотными генераторами: а) через 15 мин после начала воздействия, б) через 45 мин после начала воздействия.

Из рисунка следует, что при использовании 24 стационарных генераторов, расположенных на территории карьера, через 45 мин после начала воздействия дальность видимости в тумане изменилась с 30 м до более, чем 600 м.

Численные эксперименты по воздействию на слоистообразную облачность с помощью модели «Seeding» были проведены для территории Республики Крым. Воздействия проводились с помощью наземных генераторов аэрозолей йодистого серебра. Для проведения расчетов использовались наземные данные о температуре, влажности воздуха, направлении и скорости ветра и данные радиозондирования атмосферы.

На рис. 3 приводятся результаты расчетов изменения суммы осадков (%) через 2 и 3 часа после начала воздействия.

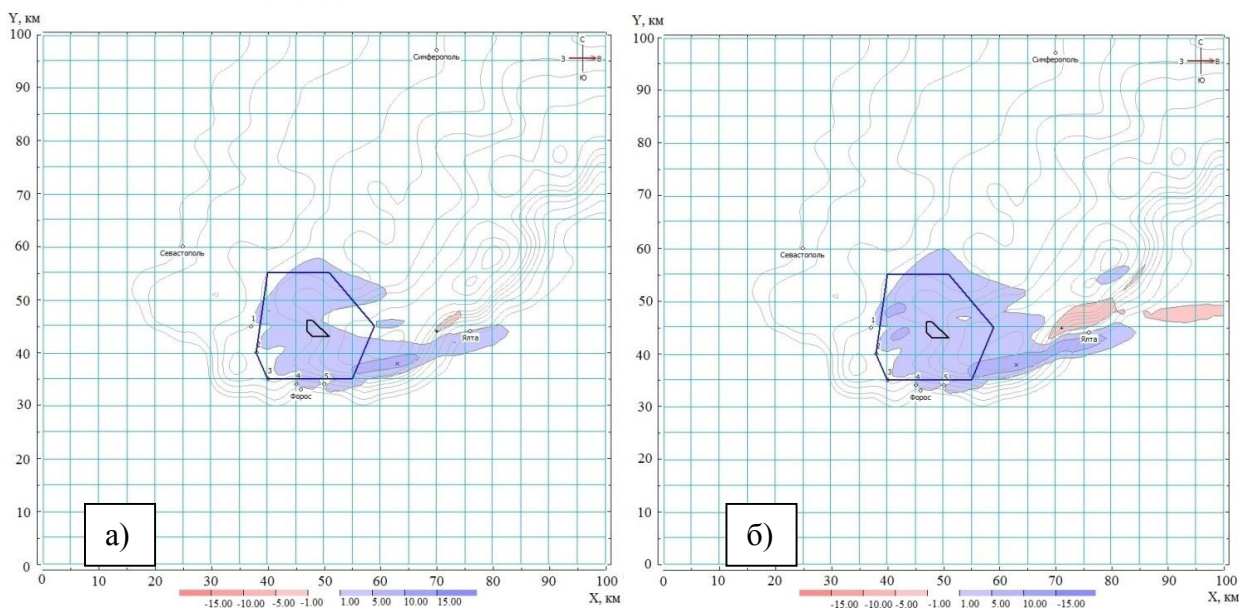


Рис. 3. Изменение суммы осадков (%) через 2 часа (а) и 3 часа (б) после начала воздействий пятью наземными генераторами аэрозолей йодистого серебра.

Как видно из рисунка, при работе наземными генераторами аэрозолей йодистого серебра через 2 и 3 часа после начала воздействий происходит увеличение суммы осадков соответственно на 7% и 10% над мишенью по сравнению с естественными осадками, выпавшими вне зоны воздействий.

Таким образом, проведенные численные эксперименты показали, что разработанные в АНО «Агентство АТТЕХ» трёхмерные численные модели «Fog Seeding» и «Seeding» могут использоваться для оценки эффекта воздействий на переохлажденные туманы и низкую слоистообразную облачность с помощью наземных аэрозольных генераторов.

### ***Список литературы***

1. 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.
2. 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, 517-529.
3. 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, 132, 519–542.
4. 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, 136, 5095–5115.
5. Cooper W. A. // Ice initiation in natural clouds. Precipitation Enhancement—A Scientific Challenge, Meteor. Monogr., 1986, No. 43, Amer. Meteor. Soc., 29–32.

6. Bigg E. K. // The supercooling of water. Proc. Phys. Soc. London, 1953, B66, 688–694.
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, 38, 29–62.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ С УЧЕТОМ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ И ДАННЫХ ДМРЛ**

**Шаповалов А.В.<sup>1</sup>, Рязанов В.И.<sup>1</sup>, Гучаева З.Х.<sup>1</sup>, Увижева Ф.Х.<sup>2</sup>, Шаповалов В.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

<sup>2</sup> Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН,  
г. Нальчик

Вопросы математического моделирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере достаточно подробно рассмотрены в работах [1-10]. Вместе с тем, эта проблема требует дальнейшего развития, в частности, для регионов с широким спектром местных условий, для специфических источников примесей. Построение математических моделей распространения атмосферных примесей позволяет исследователям решать широкий спектр задач, в том числе, изучать региональные и локальные особенности загрязнения окружающей среды. Существует проблема построения адекватных математических моделей, позволяющих достаточно корректно описывать распространение примесей [1,2,7]. Большую сложность представляет создание региональных моделей. Тем не менее, необходимость подобных моделей обусловлена наличием характерных для мезорайона особенностей, которые весьма существенны для корректных оценок. Следует отметить, что по состоянию на текущее время, разработка моделей распространения примесей находится еще на этапе развития.

В данной работе представлена разработанная модель распространения примесей с учетом микрофизических процессов вымывания в облаках и туманах и сухого осаждения. Приведены результаты численных экспериментов по моделированию распространения примесей. В экспериментах варьировались: концентрация загрязнителей, коэффициенты турбулентной диффузии, метеорологические параметры, поле ветра. На основе результатов численных экспериментов определены закономерности распространения примесей при различных состояниях атмосферы.

Модель включает систему уравнений гидротермодинамики для описания региональных атмосферных процессов, аналогичную представленной в [1]. Для учета орографии в модели используется обобщенная система координат  $(\bar{x}, \bar{y}, \sigma)$ , связанная с рельефом местности

$$x \equiv \bar{x}, \quad y \equiv \bar{y}, \quad \sigma = \frac{z - \xi(x, y)}{H - \xi(x, y)} \hat{H}, \quad (1)$$

где  $H$  и  $\hat{H}$  - высота нижней и верхней границы соответственно в  $z$ - и  $\sigma$ - системе координат, а  $\xi(x, y)$  - функция, описывающая рельеф [1].

Региональная численная модель описывает изменение со временем термодинамических и динамических характеристик атмосферы в расчетной области.

Перенос многокомпонентных газовых примесей рассчитывается с учетом процессов микрофизических процессов вымывания осадками и туманами.

Основные уравнения для скорости измерения концентрации многокомпонентных газовых примесей и аэрозолей записываются в следующем виде [1]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial C_i}{\partial x_j} = F_i^{gas} - P_i^{nucl} - P_i^{cond} + P_i^{phot} + \frac{\partial}{\partial x_j} K_{jj} \frac{\partial C_i}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi_k}{\partial t} + (u_j - \delta_{j3} w_g) \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j} = F_k^{aer} + P_k^{nucl} + P_k^{cond} + P_k^{phot} + \frac{\partial}{\partial x_j} K_{jj} \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j}. \quad (3)$$

Здесь  $j = \overline{1,3}$  ( $u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w$ ), ( $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$ );  $C_i, i = \overline{1, \dots, N_g}, \varphi_k = \overline{1, \dots, N_a}$  - концентрация газовых примесей и аэрозолей;  $N_g, N_a$  - числа газовых компонент и аэрозольных фракций, соответственно; ( $u, v, w$ )- компоненты вектора скорости ветра в направлении  $x, y, z$ , соответственно;  $w_g$ - скорость гравитационного оседания;  $F^{gas}$ - и  $F^{aer}$ - источники газовых примесей и аэрозолей;  $P^{nucl}, P^{cond}, P^{coag}$  и  $P^{phot}$  - нелинейные операторы нуклеации, конденсации, коагуляции и фотохимической трансформации, соответственно.

Уравнения (2)-(3) рассматриваются в области

$$D_t = D \times [(0, T)], \quad D = \{(x, y, z); x \in [-X, X], y \in [-Y, Y], z \in [z_0, H]\},$$

где  $H$  - верхняя граница области интегрирования. Начальные условия задаются в виде:

$$C_i(x, y, z) = C_i^0(x, y, z); \quad \varphi_i(x, y, z) = \varphi_i^0(x, y, z), \quad \text{при } t = 0. \quad (4)$$

На боковых границах области задаются следующие краевые условия:

$$\begin{aligned} \varphi_i|_{\Omega} &= \varphi_i^b, \text{ есть } u_n < 0, \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial n}|_{\Omega} &= 0, \text{ есть } u_n \geq 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Omega$ - боковая поверхность,  $n$  - внешняя нормаль к  $\Omega$ ,  $u_n$  - нормальная компонента вектора скорости.

Уравнение турбулентной диффузии (2)-(5) решается по методу покомпонентного расщепления [7].

Удаление микропримесей газов из воздуха осуществляется за счет различных механизмов. Они включают в себя абсорбцию и осаждение на поверхность земли, самоочищение в процессах образования облаков и туманов, вымывание осадками и т.д. [3].

Исходной информацией для инициализации моделей является метеорологическая информация и данные о характеристиках источника.

Для расчета влажного вымывания примесей атмосферными осадками в модели используются данные радиолокационных наблюдений. С помощью метеорологических локаторов ДМРЛ-С в аэропортах через равные промежутки времени (10 мин) строятся карты распределения облаков и осадков на большой площади. Данные об интенсивности осадков позволяют рассчитывать поток примесей на поверхность земли в результате вымывания.

Для получения прогностических полей метеорологических параметров применяются данные Глобальной прогнозной системы (GFS). Реальные параметры облаков и воздушных потоков в локальной области контролируются доплеровским метеорологическим радиолокатором ДМРЛ-С.

Для анализа полей метеорологических параметров и загрязняющих веществ авторами разработан программный модуль трехмерного представления данных на основе современных графических программных библиотек.

Модуль предназначен для визуализации трехмерных наборов данных в узлах сетки, полученных в модели. Программа позволяет строить изоповерхности, плоскости линий контура, цветные плоскости, объемные представления данных в трехмерной сетке и т.д., затем вращать и анимировать изображения в режиме реального времени. Реализованы также возможности рассмотрения траектории ветра, изменение прозрачности объектов и др. Применение средств визуализации объемных данных дает возможность их интерпретации на высоком научном уровне.

Для проверки работоспособности модели, а также алгоритмов численной реализации, проведены тестовые расчеты, которые показали удовлетворительную точность при расчетах распространения примесей. Задача решалась в устойчиво стратифицированной атмосфере при следующих значениях параметров:

$$C_0 = 10^3 \text{ м}^{-3}; \quad x_0 = 5 \text{ км}; \quad y_0 = 5 \text{ км}; \quad z_0 = 5 \text{ км}; \quad V = 500 \text{ м}; \quad K = 300 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}; \\ w = 3 \text{ м с}^{-1}; \quad u=v=3 \text{ м с}^{-1}.$$

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

В данной задаче контрольной величиной является интегральное число частиц:

$$N(t) = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C(x, y, z, t) dx dy dz, \quad (6)$$

которое должно сохраняться при интегрировании системы по времени:

$$N(t) = const. \quad (7)$$

Контрольное время  $t_1$  составляло 10 мин (600 с), время  $t_2$  составляло 20 мин (1200с). На рис.1. представлены результаты тестовых расчетов – приведены изоповерхности концентрации примеси  $C = 10 \text{ м}^{-3}$  в начальный момент времени  $t_0=0$  (нижняя сфера) и в момент времени  $t_2=20$  мин (верхняя сфера). Интегральное число частиц соответственно равнялось  $N(0) = 10832$ ,  $N(t_1) = 10823$ ,  $N(t_2) = 10823$ . Как видно, условие (7) выполняется с высокой точностью.

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

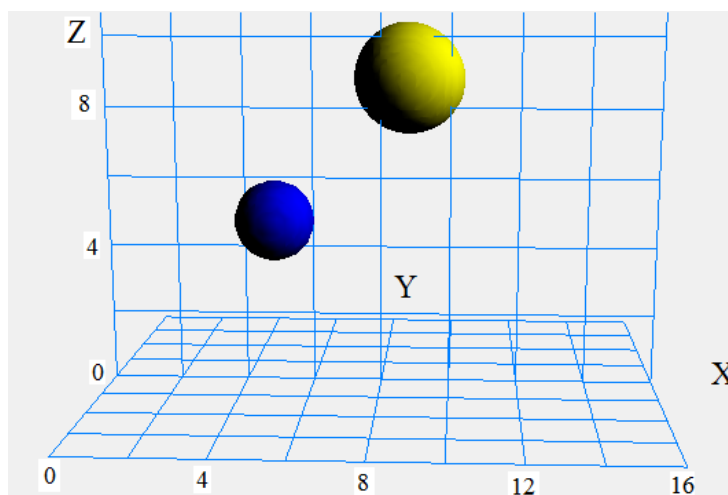


Рис.1. Изоповерхности концентрации частиц  $C = 10 \text{ м}^{-3}$  в моменты времени  $t_0=0$  (нижняя сфера) и  $t_2=20$  мин (верхняя сфера).

На основе построенной модели проведены предварительные расчеты при различных метеорологических данных. Моделировался стационарный источник.

Была выбрана область представляющая собой прямоугольный пространственный параллелепипед со сторонами  $16 \times 16 \times 10$  км Ось Y направлена на север, ось X – на восток. В области заданы метеорологические параметры по варианту GFS.

Сложности вызваны необходимостью расчета поля ветра и коэффициентов турбулентной диффузии в зависимости от состояния атмосферы [1-3]. На рис.2 представлена карта горизонтального ветра по данным доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С.



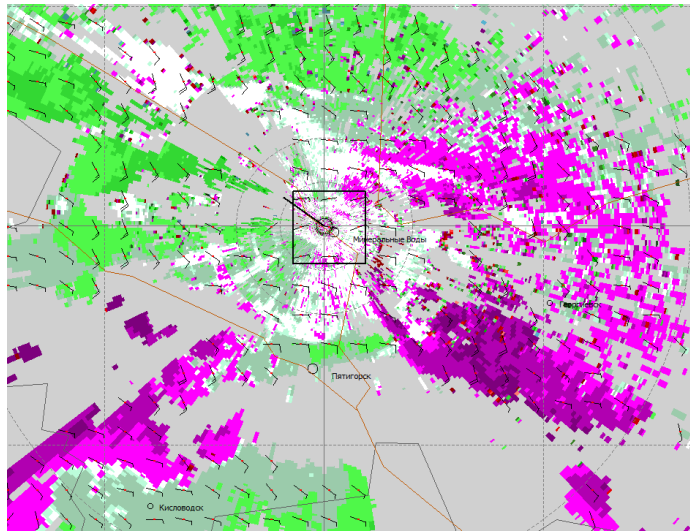


Рис.2. Карта горизонтального ветра по данным ДМРЛ-С. Стрелками указано направление и скорость ветра.

Модель позволяет по реальным данным поля ветра и облачности в атмосфере рассчитывать распространение примесей от различных источников. Использование данных доплеровских ДМРЛ-С значительно улучшает анализ экологической обстановки в исследуемом районе.

Пример расчета распространения легкой примеси представлен на рис.3. Вертикальное распределение термодинамических параметров атмосферы и другие метеопараметры построены по данным Глобальной системы GFS.

Рассмотрим также некоторые результаты численного моделирования рассеивания и переноса загрязняющих веществ при испытаниях РН в атмосфере с вертикальным сдвигом ветра.

Распространение и перенос вредных веществ изучались для совмещенного объемного и линейного источников при метеорологических условиях основных сезонов года. В расчетах использовались модельные параметры источника. Максимальная концентрация примеси составляла  $10^7$  мкг·м<sup>-3</sup>.

Процесс распространения примесей рассматривался в области 20x20x10 км с шагом  $dx=dy=dz=200$  м, шаг по времени  $dt=5$  с.

В качестве примера на рис.4 и рис.5 приведены концентрации примеси в моменты времени  $t=1$  мин и  $t=6$  мин.

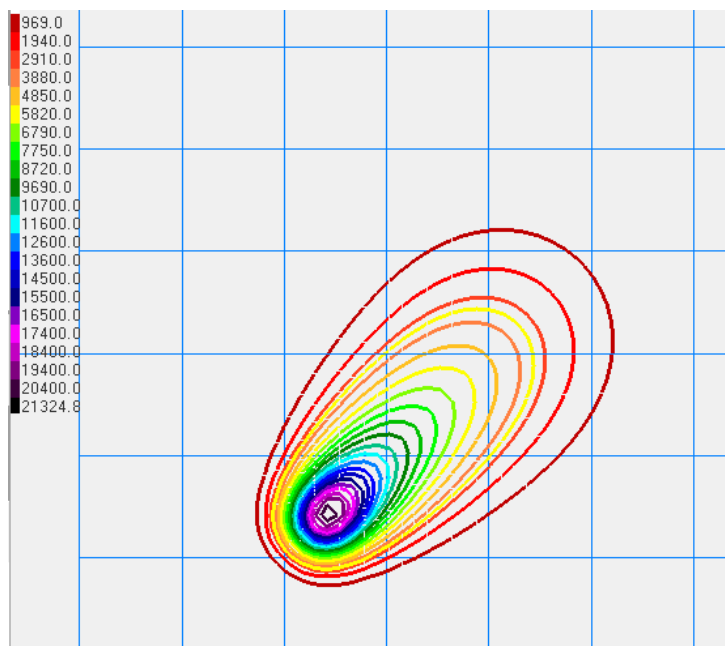


Рис.3. Изолинии концентрации примеси от стационарного источника в момент времени  $t=20$  мин при  $K=300 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ .

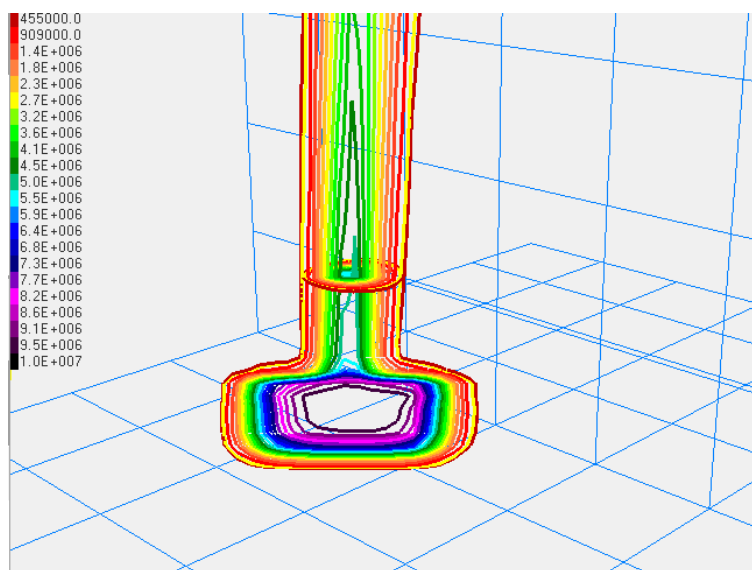


Рис.4. Изолинии концентрации примеси в вертикальной и горизонтальной плоскостях для линейного источника в момент времени  $t=1$  мин.

Облако примеси перемещается по ветру, из-за вертикального сдвига ветра в атмосфере столб загрязненного воздуха наклоняется. Одновременно из-за турбулентной диффузии происходит расширение следа и уменьшение концентрации загрязняющего вещества.

Весной и летом, когда температуры выше, интенсивность турбулентного обмена больше, рассеивание примесей усиливается.

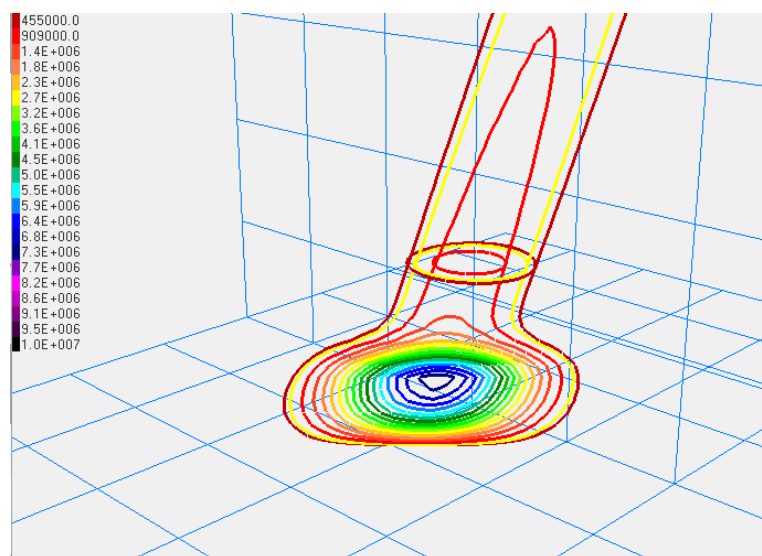


Рис.5. Изолинии концентрации примеси в вертикальной и горизонтальной плоскостях для линейного источника в момент времени  $t=6$  мин.

### **Выводы**

Разработана математическая модель распространения примесей в локальной области с учетом фактических или прогнозных полей метеопараметров.

Разработаны алгоритмы и программные модули применения данных ДМРЛ-С для построения поля ветра в расчетной области.

При создании информационных систем обеспечения метеорологической и экологической безопасности жизнедеятельности людей наличие такой модели дает возможность количественного анализа ситуации на фоне детальной картины распределения метеорологических параметров.

### **Список литературы**

1. Алоян А.Е., Пененко В.В., Козодеров В.В. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды // в кн. Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования, т.2, Математическое моделирование. М.: Наука, 2005. С. 279-351.
2. Архипов В. А., Березиков А.П., Шереметьева У.М. и др. Моделирование распространения аэрозольного облака при выбросе жидких ракетных топлив в атмосферу // Оптика атмосферы и океана, 2004. Т. 17, №5-6. С. 488-493.
3. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 265 с.
4. Васянина А.Ю., Тонких А.А., Антоновский Т.Н., Швецова Д.С., Чижевская М.В., Назаров В.П. Влияние продуктов сгорания жидкого и твердого ракетного топлива на окружающую среду // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. №10. 2014. С.211-212.

5. Климова Е.Г., Мороков Ю.Н. и др. Математическая оценка зон загрязнения поверхности земли ракетным топливом при падении отделяющихся частей ракет-носителей // Оптика атмосферы и океана, 2005. Т. 18, № 5, 6. С. 525-529.
6. Ключников В.Ю. и др. Оценка воздействия космического ракетного комплекса «Рокот» на окружающую природную среду КБТМ, ГКНПЦ им. М.В.Хруничева, 1998. 637 с.
7. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме охраны окружающей среды. М.: Наука, 1982. 190с.
8. Тимнат И.Н. Ракетные двигатели на химическом топливе, 6–е изд., перераб. и доп. М: Дрофа, 2005. 528 с.
9. Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Трехмерная визуализация геофизической информации для решения прикладных задач // Наука. Инновации. Технологии. №1(5). 2014. С. 65-73.
10. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду: Справочное пособие / Под общ. ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, А.В. Петрова. М.: «Анкил», 2000. 308 с.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ГОРНОСТЕПНОЙ ЗОНЕ**

**Керимов А.М., Шаповалов А.В.**

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Горы существенным образом воздействуют на погоду в окрестностях. Вследствие динамических и термодинамических процессов наблюдается существенная модификация синоптических систем погоды или воздушных потоков в значительном слое атмосферы [2]. Наблюдается периодическое возникновение характерных региональных условий погоды, в том числе систем ветров, облачности и режимов осадков, вызываемых динамическими и термодинамическими процессами. Еще один тип воздействия гор на метеорологические параметры является результатом наличия множества склонов с различной пространственной ориентацией. Он проявляется главным образом в локальном масштабе (от десятков и сотен

метров) и формирует мозаику топоклиматов. В случае систем склоновых и долинных ветров этот тип может проявляться в региональном масштабе.

В последнее время экосистемы гор испытывают большие нагрузки в результате человеческой деятельности. Актуальной задачей, в связи с этим, является прогноз их изменения под воздействием различных факторов. Одним из этапов таких исследований является изучение распространения загрязняющих веществ в результате деятельности промышленных предприятий, объектов энергетики, транспорта, вследствие пожаров и аварий различного происхождения.

Построение математических моделей распространения атмосферных примесей позволяет исследователям решать широкий спектр задач, в том числе, изучать региональные особенности загрязнения окружающей среды [1,4,6].

Исходной информацией для инициализации моделей является метеорологическая информация и данные о текущем состоянии природной среды.

Существует проблема построения адекватных математических моделей, позволяющих достаточно корректно описывать распространение примесей [1,3-5,7]. Большую сложность представляет создание региональных и мезомасштабных моделей. Но необходимость подобных моделей, обусловлена наличием характерных для мезорайона особенностей, которые весьма существенны для корректных оценок. Следует отметить, что разработка таких моделей находится еще на начальном этапе развития.

В данной работе представлена математическая модель распространения примесей в мезомасштабной области, охватывающей горы, предгорья, и часть степной зоны (на примере КБР). В модель заложены соответствующие природно-климатические условия. Тестовые расчеты показали удовлетворительную точность используемой модели.

Численные методы прогноза загрязнения воздуха реализуются с помощью уравнений, описывающих распространения примесей в атмосфере с учетом изменения их концентраций во времени [1,4].

В работе [4] дается математическое выражение задачи прогноза загрязнения воздуха, как решение при определенных начальных и граничных условиях дифференциального уравнения следующего вида:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - w \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q}{\partial z} - \alpha q, \quad (1)$$

где  $t$  - время;  $x, y, z$  - координаты;  $u, v, w$  составляющие средней скорости перемещения примеси;  $K_x, K_y, K_z$  коэффициенты турбулентного обмена,  $\alpha$  - коэффициент, определяющий изменение концентрации за счет превращения примесей.

Начальные и граничные условия определяются выражениями:

$$q(x, y, z, 0) = q_0(x, y, z) \text{ при } t=0, \quad (2)$$

$$q(x, y, z, t) = 0 \text{ при } x=0 \text{ и } x = Lx,$$

$$q(x, y, z, t) = 0 \text{ при } y=0 \text{ и } y = Ly, \quad (3)$$

$$\frac{\partial q(x, y, z, t)}{\partial z} = 0 \text{ при } z=0 \text{ и } z = Lz.$$

Уравнение турбулентной диффузии решается на сетке методом покомпонентного расщепления [1,5,7].

Удаление микропримесей газов из воздуха осуществляется за счет различных механизмов. Они включают в себя абсорбцию и осаждение на поверхность земли, самоочищение в процессах образования облаков и туманов, вымывание осадками и т.д.[6].

В предгорьях и горах туманы частое явление даже в теплый период года, поэтому вымывание примесей туманами здесь играет большую роль и необходимо учитывать этот процесс при моделировании. Производя расчет в модели изменений со временем температуры и влажности воздуха, определяются области, в которых образуется конденсированная фаза при охлаждении воздуха.

Химические реакции, обуславливающие превращение одних веществ - в другие, также можно отнести к механизмам удаления загрязнений из атмосферы. Скорость выведения газов при этом будет зависеть от химической реакционной способности их молекул, а также от растворимости в конденсированной фазе. Малореакционноспособные газовые микропримеси могут оставаться в атмосфере длительное время, а более реакционноспособные соединения, такие как сернистый газ, двуокись азота - остаются в атмосфере лишь несколько дней.

Вымывание газов в тумане может происходить тремя различными путями :

1. Путем простого растворения газов в воде тумана в соответствии с законом Генри (примерами могут служить  $N_2O$  и  $CH_4$ );
2. Путем растворения с последующей обратимой гидратацией и диссоциацией (примерами являются  $CO_2$  и  $NH_3$ );
3. Путем растворения и последующего необратимого превращения или реакции с другими веществами в воде тумана (примерами могут служить  $SO_2$  и  $NO_2$ ).

Газы-загрязнители, такие как CO, SO<sub>2</sub>, NO, NH<sub>3</sub>, обладают способностью растворяться в той или иной степени в воде. По степени растворимости их можно расположить в следующий ряд: NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, CO.

Хуже всего растворяется окись углерода. Для нее основным стоком в окружающей среде является поглощение подстилающей поверхностью, как сушей, так и поверхностью водоемов, озер, морей и океанов.

Для расчета влажного вымывания примесей атмосферными осадками в модели предлагается использовать средние значения интенсивности осадков в степной, предгорной и горной зонах для различных периодов года. Данные об осадках по физико-географическим зонам позволяют более корректно рассчитывать поток примесей на поверхность земли в результате вымывания.

Применение средств визуализации объемных данных дает возможность их интерпретации на высоком уровне.

Для проверки работоспособности модели, а также алгоритмов численной реализации проведены тестовые расчеты, которые показали эффективность модели при расчетах распространения примесей, в том числе и на средние расстояния.

На основе построенной модели проведены предварительные расчеты при различных исходных данных. Моделировался стационарный источник.

Была выбрана достаточно большая область, представляющая собой прямоугольный пространственный параллелепипед со сторонами 180x180x12 км и охватывающая зоны с различными физико-географическими характеристиками. Центр прямоугольника в основании параллелепипеда имеет координаты E:43.50, N:43.50. Ось Y направлена на север, ось X – на восток. Область полностью включает территорию КБР, частично – КЧР, Ставропольского края и РСО-Алания.

В начальный момент концентрация примеси нулевая, кроме точки (10, 120, 0.2), где концентрация равна 10<sup>3</sup> м<sup>-3</sup>.

Подстилающая поверхность в начальный момент времени чиста. Значения некоторых физических параметров, используемых при расчетах такие:

$$k_x = k_y = k_z = 15 \text{ м}^2\text{с}^{-1}; \quad v_x = 8 \text{ мс}^{-1}; \quad v_y = -8 \text{ мс}^{-1}; \quad v_z = 0.$$

На рисунке представлены результаты расчетов на момент t=300 мин.

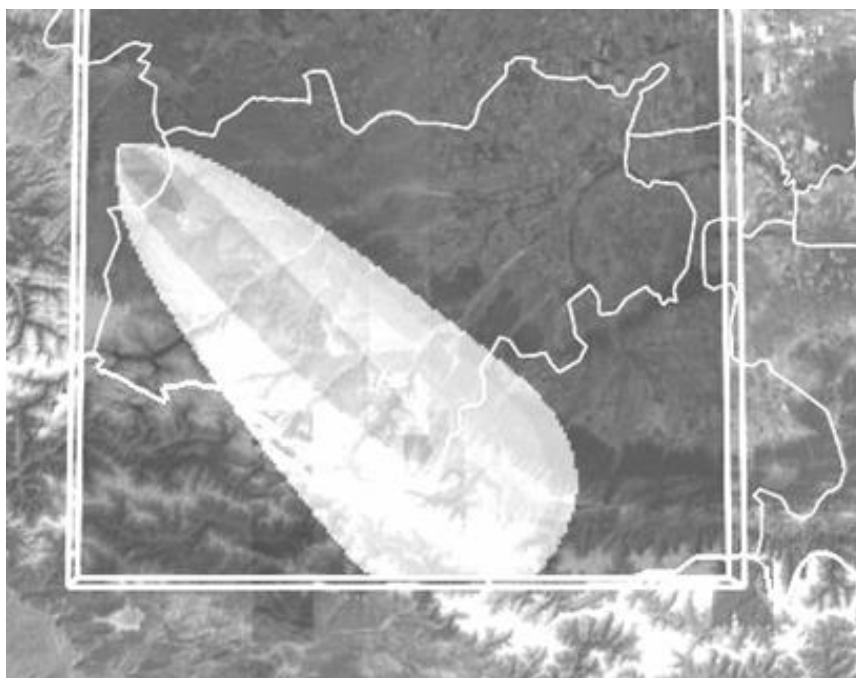


Рисунок. Результаты расчетов распространения примеси в момент времени  $t=300$  мин. Контурные линии проведены через порядок величины, внешний контур соответствует концентрации  $10^{-3} \text{ м}^{-3}$ . Отображены границы республик КБР, КЧР, РСО-А.

Результаты моделирования, получаемые с помощью разработанной математической модели, позволяют получать информацию о распределении примеси в приземном слое атмосферы от различных источников загрязнения с учетом динамических и гидротермодинамических параметров атмосферы.

Следует также отметить, что результаты численного моделирования формирования микроструктуры конвективных облаков и формирования электрического заряда в них показали, что в облаках происходят сложные взаимодействия различных физических процессов, роль которых велика и пренебрегать которыми нельзя. То же самое можно сказать и о физике распространения газовых примесей и аэрозолей. Очевидно, растворяясь в облачных каплях, примеси начинают влиять на дальнейшее развитие микрофизических процессов. Эти вопросы требуют отдельного рассмотрения.

Накопление примесей в атмосфере, обусловленное слабыми ветрами и инверсиями, усиливается в условиях туманов. Результаты теоретических расчетов [6], показывают, что в туманах наблюдается эффект аккумуляции примесей из выше- и нижележащих слоев. Вследствие этого эффекта возрастает концентрация примесей в воздухе и каплях, находящихся в тумане. Водные капли, поглощая примеси, образуют новые, иногда более вредные вещества.

При наличии инверсии и тумана содержание примесей на 20-30% больше, чем только при тумане, а через 6 часов после начала тумана при наличии инверсии это различие составляет 30-60% [6].



Большое влияние на содержание примесей в атмосфере оказывает температура воздуха. При понижении температуры, возникающая разность температур между выбросами и окружающим воздухом, приводит к большему вертикальному подъему примесей и снижению их действия на приземный слой атмосферы. Также при понижении температуры, более интенсивно расходуется топливо для обогрева помещений и, вследствие этого растут концентрации вредных выбросов в атмосферу [4].

Немаловажную роль в формировании уровня загрязнения воздуха играет солнечная радиация. Вещества, поступающие в атмосферу от источников выбросов при высокой интенсивности солнечной радиации, в результате фотохимической реакции трансформируются в различные вторичные продукты, которые часто обладают более токсичными свойствами. Для начала фотохимической реакции под влиянием солнечной радиации достаточно невысоких начальных концентраций примесей, которые могут создать потенциальные возможности для формирования высоких уровней загрязнения воздуха.

За счет переноса примеси попадают в высокогорную зону, где происходит их накопление в снежном покрове и фирне. Исследование проб снега на разной глубине залегания позволяет определять, как меняется концентрация примесей со временем.

## **Выводы**

Разработана математическая модель мезомасштабного распространения атмосферных примесей с учетом сухого осаждения и вымывания осадками. Модель применима для оценки загрязнения окружающей среды в зонах от степной - до горной, от различных источников. Учитываются рельеф местности и географическая привязка объектов. Данные интерпретируются в программе трехмерной визуализации.

Проведены расчеты распространения вредных веществ от стационарного источника.

Развитие модели осуществляется в направлении более полного учета мезомасштабных метеорологических условий, которые определяют процессы распространение примесей и их накопления на подстилающей поверхности в предгорной и горной зонах.

## ***Список литературы***

1. Алоян А.Е., Пененко В.В., Козодеров В.В. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды//в кн. Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования, т.2, Математическое моделирование. - М.: Наука, 2005. - С. 279-351.
2. Барри Р.Г. Погода и климат в горах. Пер. с англ. под ред. проф. А.Х.Хргиана. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 312 с.

3. Белов И.В., Беспалов М.С., Ключкова Л.В., Кулешов А.А., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. Транспортная модель распространения газообразных примесей в атмосфере города // Математическое моделирование, 2000, т.12, №11.- С.38-46.
4. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. - Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 448 с.
5. Дымников В.П., Алоян А.Е. Монотонные схемы решений уравнений переноса в задачах прогноза погоды, экологии и теории климата//ИАН. Физика атмосферы и океана, 1990, т.26, №12.- С. 1237-1247.
6. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. - М.: Гидрометеоздат, 1984.- 560 с.
7. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды.- М.: Наука, 1982.- 319 с.

## **РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ С НЕНУЛЕВОЙ ДИВЕРГЕНЦИЕЙ**

**Набродова Е.Г., Диденко А.Ю., Закинян Р.Г.**

Институт математики и естественных наук  
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский Федеральный Университет», г. Ставрополь

### **Введение**

При описании крупномасштабной циркуляции атмосферы считается, что допущение о равенстве нулю дивергенции скорости, является приемлемым [3, 4]. Однако, как известно, при описании облачной конвекции это допущение не верно. Поэтому целью настоящей статьи является исследование распространения планетарных волн в атмосфере с ненулевой дивергенцией скорости. В частности, непосредственной задачей статьи является получение выражения для скорости распространения планетарных волн во вращающейся атмосфере с ненулевой дивергенцией скорости.

### **1. Основные формулы**

Рассмотрим движение сухого воздуха, описываемого уравнением движения идеальной жидкости в неинерциальной системе отсчета, с учетом вращения Земли [1 – 7]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho_1} \nabla p + 2[\mathbf{v}\boldsymbol{\omega}_0], \quad (1)$$

где  $\mathbf{v}$  – скорость движения частицы воздуха;  $\rho_1$  – плотность движущейся частицы воздуха;  $p$  – давление на движущуюся частицу воздуха со стороны окружающего ее воздуха.

Рассмотрим плоскость, касательную к поверхности Земли в данной точке. Ось  $z$  направим перпендикулярно поверхности Земли.

В состоянии равновесия (статики):

$$\mathbf{v} = 0, \mathbf{g} - \frac{1}{\rho_e} \nabla \bar{p} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\rho_e$  – плотность окружающей воздушную частицу атмосферы;  $g$  – ускорение свободного падения.

Давление можно представить в виде  $p = \bar{p} + p'$ . Параметры окружающей атмосферы мы рассматриваем как невозмущенное состояние. Для плотности движущейся воздушной частицы в приближении Буссинеска можно записать выражение [3, 5, 6]:

$$\rho_1 \cong \rho_e (1 - \alpha \Delta T), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения воздуха, равный  $\alpha \cong 1/T_0$ ,  $T_0 = 273$  К;  $\rho_1$  – плотность воздушной частицы;

$$\Delta T(z) = \Delta_0 T - \Delta \gamma \cdot (h + z) \quad (4)$$

– функция перегрева  $\Delta T(z) = T_i(z) - T_e(z)$ ;  $T_i$ ,  $T_e$  – температура, соответственно, внутри и снаружи воздушной частицы;  $\Delta \gamma = \gamma_a - \gamma$ ;  $\Delta_0 T$  – значение функции перегрева у поверхности земли;  $\gamma_a$  – сухоадиабатический градиент температуры;  $\gamma$  – градиент температуры невозмущенной атмосферы;  $h$  – высота невозмущенной изобарической поверхности.

Таким образом, мы имеем систему уравнений

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left( \frac{\partial p'}{\partial x} \right) + 2\omega_{0z}u - 2\omega_{0y}v, \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left( \frac{\partial p'}{\partial y} \right) - 2\omega_{0z}u, \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left( \frac{\partial p'}{\partial z} \right) + \alpha g \Delta T + 2\omega_{0y}u. \quad (7)$$

Уравнение неразрывности принимает вид

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha (\gamma_a - \gamma) w + \alpha u \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + \alpha v \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + \alpha w \frac{\partial \Delta T}{\partial z}. \quad (8)$$

В качестве поверхности рассматриваем уровень конвекции. Уравнение поверхности запишем в виде:  $z_s = \eta(x, y, t)$ . Дифференцируя обе части этого выражения по времени  $t$ , получим:

$$w_s = \eta_t + u\eta_x + v\eta_y, \quad (10)$$

Линеаризуем систему уравнений (5) – (7), пренебрегая в них вертикальной скоростью по сравнению с горизонтальными проекциями скорости и вертикальным ускорением:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \left( \frac{\partial p'}{\partial x} \right) + 2\omega_{0z}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \left( \frac{\partial p'}{\partial y} \right) - 2\omega_{0z}u, \quad (12)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho_e} \left( \frac{\partial p'}{\partial z} \right) + \alpha g \Delta T + 2\omega_{0y}u. \quad (13)$$

Линеаризуем уравнение (10):

$$w_s = \eta_t, \quad z = z_s. \quad (14)$$

Интегрируем уравнение (13) по  $z$ , линеаризуем полученное выражение и получим:

$$p' = -\alpha \Delta_h T \cdot \rho_e g \eta. \quad (15)$$

С учетом выражения (15) система уравнений (11) – (12) запишется в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g \alpha \Delta_h T \frac{\partial \eta}{\partial x} + 2\omega_{0z}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g \alpha \Delta_h T \frac{\partial \eta}{\partial y} - 2\omega_{0z}u. \quad (17)$$

Вертикальная составляющая скорости у плоской поверхности земли (без учета топографии) равна нулю:

$$w|_{z=-h} = 0. \quad (18)$$

Таким образом, мы получаем систему уравнений (8), (16), (17).

Далее поступим также как и в [6], возьмем производную по координате  $x$  от (16) и по координате  $y$  от (17), сложим и получим

$$-\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial w}{\partial z} = g \alpha \Delta_h T \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + 2\omega_{0z} \Omega_z, \quad (19)$$

где

$$\Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (20)$$

– вертикальная проекция вихря скорости.

Уравнение переноса вихря получается из уравнений движений (16) и (17) дифференцированием (16) по координате  $y$ , а (20) по координате  $x$  и вычитанием полученных выражений:

$$\frac{\partial \Omega_z}{\partial t} = 2\omega_{0z} \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (21)$$

Подставляя выражение (21) в уравнение (19), получим

$$\frac{\partial^2 \Omega_z}{\partial t^2} = -2\omega_{0z} g \alpha \Delta_h T \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) - (2\omega_{0z})^2 \Omega_z. \quad (22)$$

Таким образом, задача свелась к решению системы уравнений (16), (17) и (22).

В общем случае компоненты скорости можно представить в виде

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (23)$$

Из линеаризованного уравнения неразрывности (8) следует

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \alpha (\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad (24)$$

т.е. потенциал скорости уже подчиняется уравнению Лапласа. Вертикальная составляющая вихря равна

$$\Omega_z = - \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right). \quad (25)$$

## 2. Решение системы уравнений

Будем искать решение полученной системы (16), (17) и (22) в виде:

$$u = U e^{-i\omega t}, \quad v = V e^{-i\omega t}, \quad w = W e^{-i\omega t}, \quad \eta = Z e^{-i\omega t}. \quad (26)$$

Тогда

$$\Omega_z = \Omega_{0z} e^{-i\omega t}. \quad (27)$$

Из уравнений (16), (17) и (8) получим

$$i\omega U + 2\omega_{0z} V = -g\alpha\Delta_h T \frac{\partial Z}{\partial x}, \quad (28)$$

$$2\omega_{0z} U - i\omega V = g\alpha\Delta_h T \frac{\partial Z}{\partial y}, \quad (29)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = \alpha (\gamma_A - \gamma) W. \quad (30)$$

Отсюда

$$U = -g\alpha\Delta_h T \frac{2\omega_{0z} \frac{\partial Z}{\partial y} - i\omega \frac{\partial Z}{\partial x}}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2}, \quad (31)$$

$$V = g\alpha\Delta_h T \frac{2\omega_{0z} \frac{\partial Z}{\partial x} + i\omega \frac{\partial Z}{\partial y}}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2}. \quad (32)$$

Сравнивая полученные равенства с выражениями (23), для амплитуд потенциала скорости и функции тока находим

$$\Phi = g\alpha\Delta_h T \frac{i\omega Z}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2}, \quad (33)$$

$$\Psi = -g\alpha\Delta_h T \frac{2\omega_{0z} Z}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2}. \quad (34)$$

Отсюда, для амплитуды вертикальной составляющей скорости получим

$$W = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = g\alpha\Delta_h T \frac{i\omega}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \frac{\partial Z}{\partial z}. \quad (35)$$

Из уравнения для потенциала скорости следует:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial Z}{\partial z}. \quad (36)$$

Решение этого уравнения будем искать в виде

$$Z = \tilde{Z}(z) \exp[i(k_1 x + k_2 y)]. \quad (37)$$

Тогда для амплитуды возмущения поверхности получим уравнение

$$\frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial z^2} - \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial z} - k^2 \tilde{Z} = 0, \quad (38)$$

где  $k^2 = k_1^2 + k_2^2$ . Это уравнение имеет решение

$$\tilde{Z} = A_1 e^{k_1 z} + A_2 e^{k_2 z}, \quad (39)$$

$$k_{1,2} = \frac{\alpha(\gamma_A - \gamma)}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2(\gamma_A - \gamma)^2}{4} + k^2} = k_0 \pm \tilde{k},$$

$$\tilde{k} = \sqrt{k_0^2 + k^2},$$

где  $A_1, A_2$  – константы,  $k$  – волновое число, величина положительная. Из граничного условия (18) и уравнения (35) следует, что

$$\frac{\partial \tilde{Z}}{\partial z} = 0, \quad z = -h. \quad (40)$$

Отсюда для амплитуды возмущения получим

$$\tilde{Z} = A e^{k_0(h+z)} \left\{ k_0 \cdot \text{sh}[\tilde{k}(h+z)] - \tilde{k} \cdot \text{ch}[\tilde{k}(h+z)] \right\}. \quad (41)$$

Подставляя в уравнение (22) выражения для величин  $\eta$  и  $\Omega_z$  из формул (26) и (27), получим

$$-\omega^2 \Omega_{0z} = -2\omega_{0z} g \alpha \Delta_h T \left( \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right) - (2\omega_{0z})^2 \Omega_{0z}.$$

С учетом выражения для амплитуды возмущенной поверхности (37) запишем

$$\Omega_{0z} = -\frac{2\omega_{0z} g \alpha \Delta_h T k^2}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \tilde{Z}. \quad (42)$$

Из уравнения (21) следует

$$-i\omega \Omega_{0z} = 2\omega_{0z} \frac{\partial W}{\partial z}.$$

С учетом (35) получим

$$\Omega_{0z} = -g \alpha \Delta_h T \frac{2\omega_{0z}}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}. \quad (43)$$

Из уравнения (14) следует  $W = -i\omega Z$ . Подставляя полученное выражение в уравнение (35), получим

$$Z = -g \alpha \Delta_h T \frac{1}{\omega^2 - (2\omega_{0z})^2} \frac{\partial Z}{\partial z}. \quad (44)$$

С учетом выражения (41) запишем для значения  $z = 0$ :

$$\omega^2 = (2\omega_{0z})^2 + g \alpha (-\Delta_h T) \frac{(k_0^2 - \tilde{k}^2) \cdot \text{th}(\tilde{k}h)}{k_0 \cdot \text{th}(\tilde{k}h) - \tilde{k}}. \quad (45)$$

Дисперсионное соотношение (45) представим в виде

$$\omega^2 = (2\omega_{0z})^2 + c_0^2 \tilde{k}^2,$$

где

$$c_0 = \sqrt{g \alpha (-\Delta_h T) \frac{\frac{k^2}{\tilde{k}^2} \cdot \text{th}(\tilde{k}h)}{\tilde{k} - k_0 \cdot \text{th}(\tilde{k}h)}} = \sqrt{gh \alpha (-\Delta_h T)} \frac{k}{\tilde{k}} \sqrt{\frac{\text{th}(\tilde{k}h)}{\tilde{k}h - k_0 h \cdot \text{th}(\tilde{k}h)}} \quad (46)$$

– скорость волны в отсутствии вращения Земли.

Найдем

$$\frac{1}{\sqrt{gh\alpha(-\Delta_h T)}} \frac{dc_0}{dk} = \frac{k_0^2}{\tilde{k}^3} \sqrt{\frac{\text{th}(\tilde{k}h)}{\tilde{k}h - k_0h \cdot \text{th}(\tilde{k}h)}} +$$

$$+ \frac{1}{2\sqrt{\text{th}(\tilde{k}h)}} \frac{k^2 h [1 - \text{th}^2(\tilde{k}h)] [\tilde{k}h - k_0h \cdot \text{th}(\tilde{k}h)] - \text{th}(\tilde{k}h) \{1 - k_0h [1 - \text{th}^2(\tilde{k}h)]\}}{\tilde{k}^2 [\tilde{k}h - k_0h \cdot \text{th}(\tilde{k}h)]^{3/2}}.$$

В случае  $kh \rightarrow \infty$  и  $\text{th}(kh) \rightarrow 1$ ,

$$\frac{1}{\sqrt{gh\alpha(-\Delta_h T)}} \frac{dc_0}{dk} = \frac{k_0^2}{\tilde{k}^3 \sqrt{(\tilde{k} - k_0)h}} - \frac{1}{2} \frac{k^2}{\tilde{k}^2} \frac{1}{\sqrt{h}(\tilde{k} - k_0)^{3/2}} = 0,$$

$$\tilde{k}_{\text{cr}} = k_0.$$

В случае  $kh \rightarrow 0$  и  $\text{th}(kh) \rightarrow kh$ ,

$$c_0 = \frac{k}{\tilde{k}} \sqrt{gh\alpha(-\Delta_h T)}, \quad \frac{1}{\sqrt{gh\alpha(-\Delta_h T)}} \frac{dc_0}{dk} = \frac{k_0^2}{\tilde{k}^3} \neq 0$$

Фазовая скорость волны равна

$$c = \sqrt{c_0^2 + \frac{(2\omega_{0z})^2}{\tilde{k}^2}}. \quad (47)$$

Из условия  $kh \ll 1$  найдем скорость волны в приближении мелкой воды:

$$c = \frac{k}{\tilde{k}} \sqrt{\alpha(-\Delta_h T) gh + \frac{(2\omega_{0z})^2}{k^2}}. \quad (48)$$

### 3. Результаты

Таким образом, мы пришли к известному результату [3, 6], что вращение Земли приводит к появлению дисперсии у поверхностных гравитационных волн, но получили, при этом, новое выражение для скорости гравитационных волн во вращающейся атмосфере с ненулевой дивергенцией. Формула (47) формально совпадает с известным выражением скорости, но формула (48) указывает на существенное их различие. А именно, из формулы (48) следует, что для случаев, когда вращением Земли можно пренебречь  $\left(\frac{2\omega_{0z}}{k} \ll c_0\right)$ , в волновое движение вовлекается только лишь переохлажденный ( $\Delta_h T < 0$ ) за счет адиабатического подъема первоначально теплый у поверхности земли воздух. Кроме того, из формулы (48) следует, что в атмосфере с нулевой дивергенцией скорость распространения гравитационных волн больше. Таким образом, наличие дивергенции уменьшает скорость распространения гравитационных волн.



Из формулы (48) следует, что вращение приводит, с одной стороны, к дисперсии волн, а с другой стороны, к тому, что в волновое движение вовлекается не только переохлажденный на высоте конвекции  $h$  воздух, но и теплый воздух для длин волн, больших некоторого критического значения. Заметим, что в приближении  $f$ -плоскости нет ограничения сверху для длины волн, т.е. они могут принимать бесконечно большие значения, что, конечно, не имеет места для ограниченной геометрии Земли.

Для возмущенной поверхности волны получим

$$\eta = Ae^{k_0 h} [k_0 \cdot \text{sh}(\tilde{k}h) - \tilde{k} \cdot \text{ch}(\tilde{k}h)] e^{i(k_1 x + k_2 y - \omega t)}, \quad \omega = \sqrt{c_0^2 \tilde{k}^2 + (2\omega_{0z})^2}. \quad (49)$$

Найдем скорость планетарной волны в приближении бесконечно протяженной по высоте атмосферы. В этом случае  $kh \rightarrow \infty$  и  $\text{th}(kh) \rightarrow 1$ , поэтому для волн с длиной волны  $\lambda \ll h$  получим

$$c = \sqrt{\frac{g\alpha(-\Delta_h T)}{\tilde{k} - k_0} \frac{k^2}{\tilde{k}^2} + \frac{(2\omega_{0z})^2}{k^2}}. \quad (50)$$

В общем случае, из выражения (50) следует, что в волновое движение может вовлекаться не только холодный воздух, но и теплый воздух с длиной волны больше критического значения, определяемого из неравенства:

$$\frac{(2\omega_{0z})^2}{g\alpha\Delta_h T} \geq \frac{(k_0^2 - \tilde{k}^2) \cdot \text{th}(\tilde{k}h)}{k_0 \cdot \text{th}(\tilde{k}h) - \tilde{k}}. \quad (51)$$

Заметим, что из формулы (50) следует, что скорость теплой волны меньше, чем скорость распространения холодной волны.

## **Выводы**

Таким образом, мы получили новое выражение для скорости гравитационных волн во вращающейся атмосфере с ненулевой дивергенцией.

Показано, что в атмосфере с нулевой дивергенцией скорость распространения гравитационных волн больше. Таким образом, наличие дивергенции уменьшает скорость распространения гравитационных волн.

## **Список литературы**

1. Andrews D.G. An Introduction to Atmospheric Physics. Second edition. Cambridge University Press, 2010, p. 237.
2. Cushman-Roisin B., Beckers J-M. Introduction to Geophysical Fluid Dynamics. Second edition. International geophysics series, vol. 101. Elsevier, 2011, p. 828.

3. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Forth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
4. Marshall J., Plumb R.A. Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics. International geophysics series, vol. 93. Elsevier, 2008, p. 324.
5. Nappo C.J. An Introduction to Atmospheric Gravity Waves. International geophysics series, vol. 85. Elsevier, 2002, p. 279.
6. Pedlosky J. Waves in the Ocean and Atmosphere. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, p. 260.
7. Zdunkowski W., Bott A. Dynamics of the Atmosphere. Cambridge University Press, 2003, p. 719.

## **ОПИСАНИЕ ВИХРЕВОГО СОСТОЯНИЯ СУХОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ НАЛИЧИИ ДИВЕРГЕНЦИИ СКОРОСТИ**

**Семенова Ю.А., Закинян А.Р., Закинян Р.Г.**

Институт математики и естественных наук  
ФГАОУ «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь

### **Введение**

Как правило, при описании крупномасштабной циркуляции в атмосфере принимается, что дивергенция скорости движения воздуха равна нулю. Другими словами, при написании уравнения неразрывности воздух представляется жидкостью с постоянной плотностью. Утверждается, что в этом случае воздух считается несжимаемым и это допустимо при скоростях движения намного меньших скорости звука. Но, в общем случае, это не так. Дивергенция скорости не равна нулю и при скоростях движения воздуха намного меньших скорости звука.

Поэтому в работе предложена математическая модель вихревого состояния сухой атмосферы с неравной нулю дивергенцией скорости движения воздуха.

### **1. Основные формулы**

В локальной системе координат  $(x, y, z)$  состояние атмосферы описывается системой уравнений

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \nu \nabla^2 u + 2\omega_{0z} v - 2\omega_{0y} w, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \nu \nabla^2 v - 2\omega_{0z} u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) - g + \nu \nabla^2 w + 2\omega_{0y} u, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \Delta T = \kappa \nabla^2 \Delta T, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha (\gamma_A - \gamma) w + \alpha u \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + \alpha v \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + \alpha w \frac{\partial \Delta T}{\partial z}. \quad (5)$$

Здесь  $\Delta T = T_i - T_e$ . Представим параметры атмосферы в виде:

$$p = \bar{p}(z) + p'(x, y, z, t), \quad \Delta T = \overline{\Delta T}(z) + \theta(x, y, z, t), \quad \overline{\Delta T} = \Delta_0 T - \Delta \gamma \cdot z, \quad \Delta \gamma = \gamma_a - \gamma.$$

Выражение для плотности воздуха имеет вид  $\rho_i = \rho_e (1 - \alpha \theta)$ . Запишем уравнения в безразмерном виде. Для горизонтальных и вертикальных направлений в качестве масштабов длины выберем  $L$  и  $H$ , характерное значение скорости в горизонтальном направлении –  $U$ , характерное время –  $L/U$ , шкалу вертикальной скорости –  $HU/L$ , шкалу для давления  $\rho_e U^2$ , шкалу для  $\theta$  –  $\Delta_z T = \Delta_0 T - \Delta T(H) = \Delta \gamma \cdot H$ . В то же время, мы устанавливаем безразмерные параметры:  $\delta = H/L$ ;  $Re = UL/\nu$  (число Рейнольдса);  $Ri = H\kappa N^2/U^3$  (число Ричардсона);  $N$  – частота Брента – Вайсяля,  $N^2 = \alpha g \Delta \gamma$ ;  $Pr = \nu/\kappa$  (число Прандтля);  $Ro_L = U/2\omega_{0z} L$  (число Россби), [1],  $Ro_H = \frac{U}{2\omega_{0y} H}$ . Тогда безразмерная форма для уравнений примет вид

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + \frac{1}{Ro_L} v - \frac{1}{Ro_H} w + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{\delta^2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right). \quad (6)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{1}{Ro_L} u + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{1}{\delta^2} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right). \quad (7)$$

$$\delta^2 \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + Ri \cdot \theta + \frac{1}{Ro_H} u + \frac{\delta}{Re} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{\delta^2} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right). \quad (8)$$

$$\frac{1}{Pr Re} \frac{d\theta}{dt} = w + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{1}{\delta^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}. \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha \Delta \gamma \cdot H \left( \frac{\gamma_A - \gamma_a}{\gamma_a - \gamma} w + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right). \quad (10)$$

Если адвективные члены в уравнениях (6) – (10) опустить, и принять  $O(\delta)=1$ , т.е.  $L=H$ , то уравнения (6) – (10) могут быть преобразованы к виду:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + \frac{1}{\text{Ro}_L} v - \frac{1}{\text{Ro}_H} w + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (6, a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{1}{\text{Ro}_L} u + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (7, a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + \text{Ri} \cdot \theta + \frac{1}{\text{Ro}_H} u + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \quad (8, a)$$

$$\frac{1}{\text{PrRe}} \frac{\partial \theta}{\partial t} = w + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (9, a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) \cdot w. \quad (10, a)$$

Берем производную по переменной  $y$  от (6, a) и производную по переменной  $x$  от (7, a), и, вычитая из второго уравнения первое, получим

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = -\frac{1}{\text{Ro}_L} D + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \Omega + \frac{1}{\text{Ro}_H} \frac{\partial w}{\partial y}.$$

Здесь

$$\Omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y},$$

– вертикальная завихренность и горизонтальная дивергенция, соответственно. Аналогично, взяв производную по переменной  $x$  от (6, a) и производную по переменной  $y$  от (7, a), и складывая уравнения, получим

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\left( \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y^2} \right) + \frac{\Omega}{\text{Ro}_L} - \frac{1}{\text{Ro}_H} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 D.$$

Таким образом, получаем систему

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{D}{\text{Ro}_L} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \Omega + \frac{1}{\text{Ro}_H} \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} - \frac{\Omega}{\text{Ro}_L} = - \left( \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 D - \frac{1}{\text{Ro}_H} \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{\partial p'}{\partial z} + \text{Ri} \cdot \theta + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 w + \frac{1}{\text{Ro}_H} u, \quad (13)$$

$$\frac{1}{\text{PrRe}} \frac{\partial \theta}{\partial t} = w + \nabla^2 \theta, \quad (14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) \cdot w. \quad (15)$$

Рассмотрим стационарное состояние атмосферы, для этого уравнения запишем в виде

$$\frac{D}{\text{Ro}_L} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \Omega + \frac{1}{\text{Ro}_H} \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (16)$$

$$- \frac{\Omega}{\text{Ro}_L} = - \left( \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 D - \frac{1}{\text{Ro}_H} \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (17)$$

$$0 = - \frac{\partial p'}{\partial z} + \text{Ri} \cdot \theta + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 w + \frac{1}{\text{Ro}_H} u, \quad (18)$$

$$0 = w + \nabla^2 \theta, \quad (19)$$

$$D + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) \cdot w. \quad (20)$$

Исключая переменные  $\Omega$ ,  $D$ ,  $\theta$  и  $p'$ , получим:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left[ (\nabla^2 \nabla^2 - \text{Ra}) w + \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_H} \nabla^2 u \right] + (\nabla^2 \nabla^2 + \text{Ta}^2) \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \\ & - \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) (\nabla^2 \nabla^2 + \text{Ta}^2) \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_H} \frac{\partial^2 \nabla^2 w}{\partial z \partial x} - \frac{\text{Re}^2}{\text{Ro}_H \text{Ro}_L} \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial y}, \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\text{Ra} = \text{Ri} \cdot \text{Re} = \frac{\kappa}{\nu} \frac{H^2 N^2}{U^2}, \quad \text{Ta} = \frac{\text{Re}^2}{(\text{Ro}_L)^2}, \quad (22)$$

$\text{Ra}$  – число Релея, а  $\text{Ta}$  – число Тейлора.

## 2. Решение системы уравнений

Будем  $w$  искать в виде

$$w = X(x)Y(y)W(z), \quad X(x) = \cos kx, \quad Y(y) = \cos ky, \quad W(z) = W_0 \cdot \sin(n\pi z). \quad (23)$$

Подставляя это выражение в уравнение (21), получим

$$\begin{aligned} & \left( 2k^2 \text{Ra} - (2k^2 + n^2 \pi^2)^3 - n^2 \pi^2 \text{Ta} \right) w + \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_H} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \nabla^2 u + \\ & + \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_H} (2k^2 + n^2 \pi^2) W_0 kn\pi \cdot \sin kx \cdot \cos ky \cdot \cos(n\pi z) - \\ & - \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) \left[ (2k^2 + n^2 \pi^2)^2 + \text{Ta}^2 n\pi \right] W_0 \cdot \cos kx \cdot \cos ky \cdot \cos(n\pi z) = \\ & = W_0 \frac{\text{Re}^2}{\text{Ro}_L \text{Ro}_H} kn\pi \cdot \cos kx \cdot \sin ky \cdot \cos(n\pi z). \end{aligned}$$

Выражение для величины  $u$  ищем в виде

$$u = -W_0 \cdot (A \cdot \sin kx \cdot \cos ky + B \cdot \cos kx \cdot \sin ky + C \cdot \cos kx \cdot \cos ky) \cdot \cos(n\pi z).$$

Подставляя это выражение в уравнение, получаем

$$\begin{aligned} & \left[ 2k^2 \text{Ra} - n^2 \pi^2 \text{Ta} - (2k^2 + n^2 \pi^2)^3 \right] W_0 \cdot \cos kx \cdot \cos ky \cdot \sin(n\pi z) - \\ & - \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_H} k (2kA - n\pi) (2k^2 + n^2 \pi^2) W_0 \cdot \sin kx \cdot \cos ky \cdot \cos(n\pi z) - \\ & - \left[ \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_H} 2k^2 (2k^2 + n^2 \pi^2) B + \frac{\text{Re}^2}{\text{Ro}_L \text{Ro}_H} kn\pi \right] W_0 \cdot \cos kx \cdot \sin ky \cdot \cos(n\pi z) - \\ & - \left\{ \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_H} 2k^2 (2k^2 + n^2 \pi^2) C + \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) \left[ (2k^2 + n^2 \pi^2)^2 + \text{Ta}^2 n\pi \right] \right\} \cdot \\ & \cdot W_0 \cdot \cos kx \cdot \cos ky \cdot \cos(n\pi z) = 0. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\text{Ra}_{\text{cr}} = \frac{(2k^2 + n^2\pi^2)^3 + n^2\pi^2\text{Ta}}{2k^2}, \quad A = \frac{n\pi}{2k}, \quad B = -\frac{\text{Re}}{\text{Ro}_L} \frac{\pi n}{2k(2k^2 + n^2\pi^2)},$$

$$C = -\frac{\text{Ro}_H}{\text{Re}} \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) \left[ 1 + \frac{n^2\pi^2}{2k^2} + \text{Ta}^2 \frac{n\pi}{2k^2(2k^2 + n^2\pi^2)} \right].$$

Таким образом,

$$\frac{u}{W_0} = -\left( \frac{n\pi}{2k} \cdot \sin kx \cdot \cos ky - \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_L} \frac{\pi n}{2k(2k^2 + n^2\pi^2)} \cdot \cos kx \cdot \sin ky + C \cdot \cos kx \cdot \cos ky \right) \cos(n\pi z). \quad (24)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) \cdot w - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z},$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = W_0 \cdot \cos kx \cdot \cos ky \cdot \left[ \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) \cdot \sin(n\pi z) - n\pi \cdot \cos(n\pi z) \right] +$$

$$+ W_0 \left[ \frac{n\pi}{2} \cdot \cos kx \cdot \cos ky + \cos kx \cdot \left( \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_L} \frac{\pi n}{2(2k^2 + n^2\pi^2)} \cdot \sin ky + Ck \cdot \cos ky \right) \right] \cos(n\pi z),$$

$$v = \frac{W_0}{k} \cdot \cos kx \cdot \sin ky \cdot \left[ \alpha H (\gamma_A - \gamma_a) \cdot \sin(n\pi z) - n\pi \cdot \cos(n\pi z) \right] +$$

$$+ W_0 \cdot \cos kx \left[ \left( \frac{n\pi}{2k} + C \right) \sin ky - \frac{\text{Re}}{\text{Ro}_L} \frac{\pi n}{2k(2k^2 + n^2\pi^2)} \cdot \cos ky \right] \cos(n\pi z). \quad (25)$$

На рис. 1 построены траектории движения частицы воздуха, построенные по формулам (23) – (25).

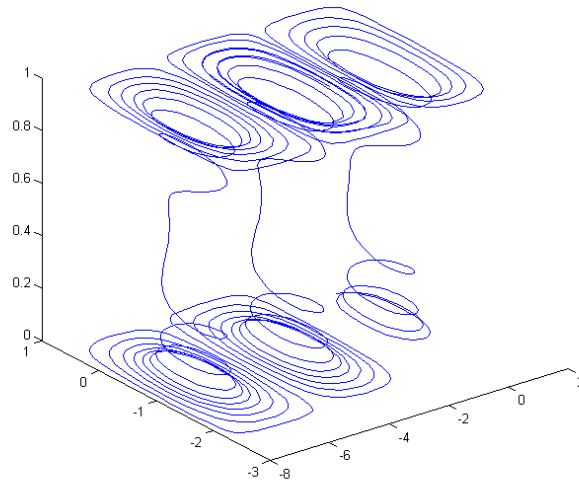


Рис. 1. Траектория движения воздушной частицы в атмосфере с ненулевой дивергенцией скорости.

Как видно из рисунка движение воздушной частицы носит вихревой характер, причем траектория движения представляет собой незамкнутую линию. Другими словами, воздушная частица переходит из одной вихревой ячейки в другую. Таким образом, показано, что основное состояние атмосферы с ненулевой дивергенцией скорости представляет собой последовательность вихревых ячеек связанных между собой.

На рис. 2 представлена траектория движения воздушной частицы в атмосфере с нулевой дивергенцией скорости.

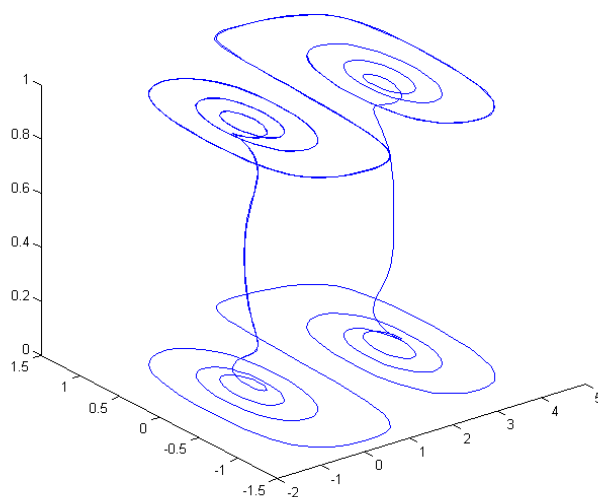


Рис.2. Траектория движения воздушной частицы в атмосфере с нулевой дивергенцией скорости.



### 3. Результаты

Как видно из рисунка, вихревое состояние атмосферы с нулевой дивергенцией представляет собой пару связанных между собой вихрей. В этом случае траектория имеет вид замкнутых линий. Причем, в нижней части левой ячейки движение носит антициклональный характер (в направлении вращения часовой стрелки). Далее, частица, закручиваясь, поднимается вверх и на высоте, равной половине высоты вихревой ячейки, меняет характер движения на вращение в противоположном направлении. И уже в верхней части этой ячейки движение носит циклональный характер (в сторону, противоположную вращению часовой стрелки). В верхней части воздушная частица переходит в правую вихревую ячейку и начинает в ней движение антициклонального характера. Закручиваясь, частица опускается вниз и также в средней по высоте части вихревой ячейки сменяет характер движения на противоположный. И уже в нижней части вихревой ячейки движение носит антициклональный характер.

Таким образом, в случае атмосферы с нулевой дивергенцией скорости мы имеем вихревой комплекс, состоящий из двух циклонов и двух антициклонов. Если в нижней части первой ячейки движение носит циклональный характер, то в верхней части этой ячейки движение носит антициклональный характер. Во второй ячейке картина противоположная. В верхней части движение циклональное, а в нижней части антициклональное. Если в первой ячейке частица движется по спирали вверх, сменяя направление вращения в средней по высоте части вихревой ячейки, то во второй ячейке частица опускается вниз, двигаясь по спирали и сменяя направление вращений в центре ячейки.

В случае атмосферы с ненулевой дивергенцией скорости картина движения отличается от описанной выше. В этом случае число вихревых ячеек не ограничено.

#### Выводы

1. Разработана математическая модель стационарного трехмерного атмосферного вихря при условии, что дивергенция скорости движения воздуха не равна нулю.
2. Получены новые выражения для компонент скорости трехмерного атмосферного вихря.
3. Показано, что при нулевой дивергенции скорости вихревое состояние атмосферы представляет собой замкнутый комплекс, состоящий из двух вихревых ячеек. Траектория движения воздушной частицы является замкнутой линией. Если в первой ячейке наблюдается подъем частицы со сменой направления вращения в центре ячейки с циклонального на антициклональное направление, то во второй ячейке наблюдается спуск со сменой направления в центре ячейки с циклонального на антициклональное направление.

При ненулевой дивергенции скорости наблюдается последовательность вихревых

ячеек с чередованием подъема и спуска в соседних ячейках. Траектория движения воздушной частицы представляет собой незамкнутые линии. В нижней половине всех ячеек наблюдается смена направления вращения в соседних ячейках с циклонального направления на антициклональное вращение. В верхних половинках ячеек наблюдается направление противоположное направлению вращения в нижней половинке ячейки.

### *Список литературы*

1. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986, Т. 1, 399 с.; Т. 2, 416 с.
2. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Forth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
3. Матвеев Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1991, 295 с.

### *1.2. Лабораторное моделирование и натурные исследования облачных процессов*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ОСАДКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЁГКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Бычков А.А.<sup>1</sup>, Сергеев Б.Н.<sup>1</sup>, Щукин Г.Г.<sup>2</sup>**

1- АНО «Агентство атмосферных технологий», г. Москва

2- ВКА им. Можайского, г. Санкт-Петербург

### **Введение**

В России в работах по активному воздействию (АВ) на облака с целью искусственного увеличения осадков (ИУО) наибольшее распространение получил самолётный метод засева облаков [1]. Для реализации самолётного метода в качестве носителей средств воздействия применяются серийно выпускаемые самолёты.

Типы и лётно-технические характеристики используемых самолётов, такие как высота, продолжительность и скорость полёта, а также масса полезной нагрузки оказали существенное влияние на технологию самолётного воздействия на облака различных форм. В настоящее время существуют два вида авиационной технологии воздействия: засев облаков сверху и засев под основанием облака. Для реализации каждой разновидности используются различные типы самолётов.

В таблице 1 приведены краткие характеристики самолётов, применяемых при проведении работ по активному воздействию на облака в нашей стране.

Таблица 1

**Основные характеристики самолётов, используемых в работах по ИУО**

Характеристика	Ил-18	Ан-12	Ан-30	Ан-26
Взлетная масса, кг	61 000	61 000	21 000	24 000
Крейсерская скорость, км/ч	617	590	430	430
Практический потолок, м	10 000	9 800	7 300	7 300
Макс. дальность полёта, км	4 270	4 560	2 550	2 340
Макс. полезная нагрузка, кг	13 500	20 000	5 500	4 100

Как видно из таблицы 1, используемые в настоящее время самолёты обладают высокими показателями по полезной нагрузке, продолжительности полёта, которые позволяют эффективно использовать их для работ по ИУО на больших территориях. Однако, использование таких самолётов в работах по АВ на облака влечёт за собой не только большие финансовые затраты на топливо, но и требует наличия сложной инфраструктуры для базирования и организации аэродромного обслуживания самолётов вблизи района проведения работ. Все эти факторы влияют на себестоимость выполнения работ и делают практически нецелесообразным их использование в оперативно-производственных работах для нужд различных отраслей экономики.

Наряду с этим в последние годы в России для гражданских задач все шире начинают применяться российские легкомоторные самолёты типа «Корвет», «Фермер», «Цикада», а также зарубежные самолёты, приобретаемые российскими авиакомпаниями, типа «Cessna», «Beechcraft King Air» и т.п.

Кроме того, в стране всё шире стали использоваться беспилотные летательные аппараты (БПЛА) различных типов. Это становится возможным благодаря улучшению их лётно-технических характеристик, увеличению их грузоподъёмности, что делает всё более актуальным одно из направлений развития авиационных технологий АВ, а именно, создание технологии воздействия на облака с помощью беспилотных летательных аппаратов [2].

Прогресс в создании легкомоторной и беспилотной авиации, а также возрастающая в последнее время потребность различных отраслей экономики в проведении работ по АВ на облака с целью искусственного увеличения осадков, таких как сельское хозяйство, водное хозяйство, авиалесоохрана, требуют разработки инновационных технологий использования этих технических средств.

Разработанные российскими специалистами методики применения самолётных технологий АВ на облака подразумевают использование в качестве источника метеорологической информации информационно-измерительной системы (ИИС). Данные, получаемые с помощью ИИС, необходимы для принятия решения о возможности проведения работ, выработки схем воздействия или их корректировок в процессе выполнения работ, оперативного контроля эффекта воздействия, а также количественной оценки его результатов [3].

Следует отметить, что существующая ИИС предполагает использование стационарных метеорологических радиолокаторов (МРЛ) и неспособна обеспечить возможность проведения работ по искусственному увеличению осадков для нужд сельского хозяйства в тех регионах России, где нет сети МРЛ [4].

В связи с этим при исследовании возможности использования легкомоторных самолётов и БПЛА в работах по увеличению осадков актуальным становится решение двух основных задач.

Первая задача - это создание мобильной информационно-измерительной системы, способной к оперативному развертыванию в районе проведения работ в местах, где отсутствует возможность получения радиолокационной информации с помощью автоматизированных радиолокационных комплексов, входящих в радиолокационную сеть Росгидромета, а также обладающей возможностью продолжительной работы вдали от стационарных источников электроэнергии.

Такая ИИС создана и используется в «Агентстве атмосферных технологий» на базе мобильного метеорологического радиолокатора ММРЛ «КОНТУР-МЕТЕО-01» [4, 5].

На рис. 1, представлена схема элементов разработанной мобильной информационно-измерительной системы и обеспечиваемых ими информационных потоков.

Данная ИИС входит в состав мобильного пункта управления работами по АВ (МПУ АВ) на облака [6]. МПУ АВ позволяет не только управлять работами по АВ на облака, но и обеспечивать такие работы информацией о вертикальном профиле ветра в районе проведения работ, получаемой с помощью БПЛА [7], а так же использовать в своём составе современные дистанционные средства [8, 9].

Второй важной задачей, для совершенствования используемой в настоящее время самолётной технологии, является исследование эффективности применения лёгких летательных аппаратов, в том числе и беспилотных, при проведении работ по ИУО.

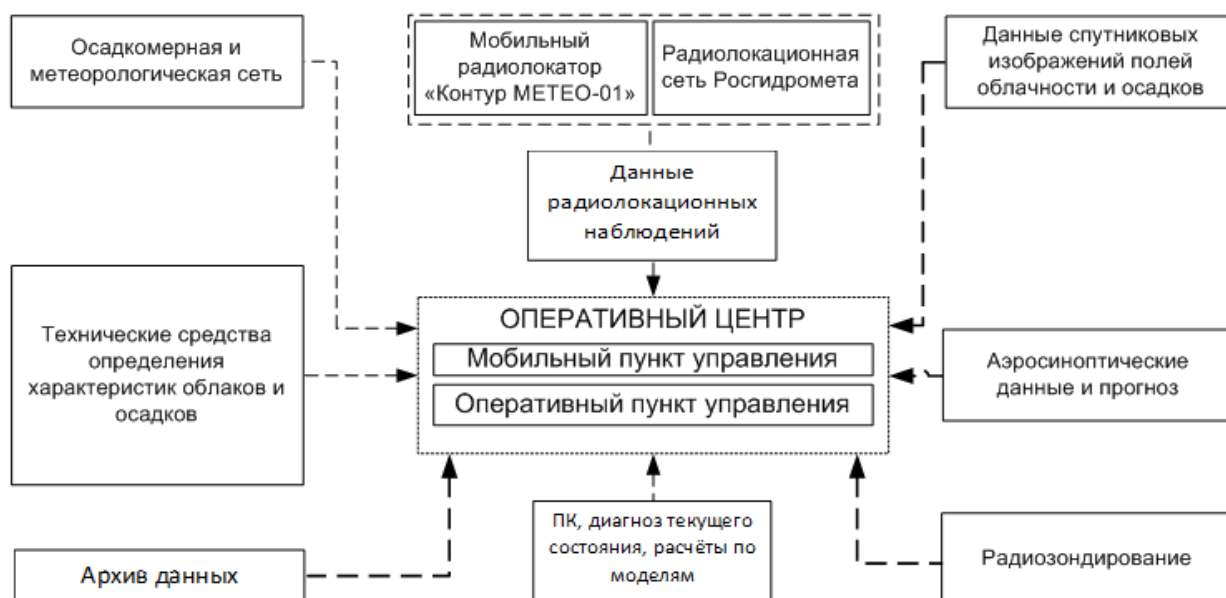


Рис. 1. Схема элементов мобильной информационно - измерительной системы.

### **Оценка эффективности применения лёгких летательных аппаратов в работах по АВ на слоистообразные облака методами численного моделирования**

Одним из основных инструментов, позволяющих произвести оценку эффективности различных средств воздействия, является численное моделирование процесса воздействий. Преимуществом такого моделирования является возможность определения на этапе планирования работ степени влияния на эффективность проведения работ по АВ таких факторов, как выбор метода воздействия, выбор типа применяемых технических средств воздействия, а также выбор режима работы выбранных технических средств с учётом конкретных синоптико- климатических и географических условий, характерных для района проведения работ.

Для численного моделирования слоистообразных облаков и выпадающих из них осадков при естественном развитии и при проведении воздействия на них, в том числе и самолётными средствами, в «Агентстве атмосферных технологий» была разработана трёхмерная численная модель «Seeding» [10, 11].

Модель «Seeding» является дальнейшим развитием разработанной в Агентстве атмосферных технологий трёхмерной численной модели «SeedDisp», позволяющей рассчитывать перенос частиц реагента в пограничном слое и свободной атмосфере при работе различных средств воздействия и реагентов. Данная численная модель подробно описана в работе [11].

Помимо переноса частиц реагента в модели «Seeding» рассчитывается эволюция полей влажности, облачной водности, концентрации ледяных кристаллов, облачной ледности, водности дождя и ледности снега.

Расчёт переноса и эволюции этих субстанций выполняется с помощью комбинирования лагранжева и эйлерова подходов. Для состояния облака, соответствующего моменту времени сразу после диспергирования реагента, перенос искусственных частиц рассчитывается по лагранжевой схеме. Как только размер засеянных объёмов становится сопоставимым с размером шага пространственной сетки, концентрация или масса частиц пересчитываются на сетку, и происходит переход к эйлеровой схеме.

Численное моделирование воздействий на слоистообразную облачность производилось для синоптических условий, наблюдавшихся в Московском регионе 5 мая 2014 года. В качестве исходной информации использовались наземные данные о суточном ходе температуры, влажности воздуха, направлении и скорости ветра, а также данные радиозондирования атмосферы, полученные станцией в г. Долгопрудный (ID 27612).

В результате радиолокационных наблюдений, выполненных с помощью ММРЛ «КОНТУР-МЕТЕО-01», были получены данные о вертикальном профиле радиолокационной отражаемости, горизонтальном и вертикальном сечении облачности (рис. 2). Анализ данных показал, что развитие облачности происходило до высоты 5000 метров, а выпадающие из облака осадки исключали возможность определения нижней границы облачности по данным радиолокационных наблюдений. Данное обстоятельство исключало возможность проведения численного моделирования воздействия на уровне нижней границы облачности с целью оценки влияния высоты внесения реагента на эффективность выполнения работ по АВ с помощью легкого летательного аппарата.



Рис. 2. Цифрокарта с отображением горизонтального (на высоте  $H = 1$  км) и вертикального сечений, и вертикального профиля радиолокационной отражаемости слоистообразной облачности, в 03:18, 05 мая 2014 года.

С помощью модели «Seeding» были проведены численные эксперименты по оценке эффективности воздействия на слоистообразную облачность с использованием лёгкого летательного

аппарата и применяемых в настоящее время в работах по ИУО самолётов типа Ан-26 (Ан-30).

В ходе выполнения численных экспериментов моделировались воздействия пиропатронами ПВ-26 с самолёта Ан-26, а также пиротехническими генераторами САГ-26 с лёгкого самолёта типа ТВС-2МС. При этом воздействия с помощью пиропатронов ПВ-26 осуществлялось сериями по 4 пиропатрона с интервалом 60 секунд, а воздействия с помощью пиротехнических генераторов САГ-26 производилось непрерывно по два генератора на протяжении всего полёта самолёта. За время проведения воздействий оба самолёта совершили пролёт четырех линий по 14 километров, при этом были соблюдены условия эквивалентного расхода реагента. Основные характеристики использованных средств воздействия приведены в таблице 2.

Таблица 2

### Характеристики пиротехнических генераторов САГ-26 и пиропатронов ПВ-26

Характеристика	САГ-26	ПВ-26
Масса пиросостава, г	92	34
Время горения, с	230	45
Содержание AgI, %	8	8
Выход льдообразующих ядер с изделия: при температуре минус 10°С при температуре минус 6°С	не менее $10^{15}$ не менее $2 \cdot 10^{14}$	не менее $4 \cdot 10^{14}$ не менее $2 \cdot 10^{14}$

Сравнение результатов численного моделирования осуществлялось по изменению основных микрофизических параметров облаков (водность, концентрация кристаллов на частицах реагента и т.д.), интенсивности осадков.

На рис. 3 приведены результаты расчётов концентрации кристаллов на частицах реагента в вертикальном сечении через 1 час после начала воздействия с помощью пиропатронов ПВ-26 и генераторов САГ-26. Вертикальное сечение было выбрано вдоль направления ветрового переноса облачности.

Из рисунка 3 видно, что при проведении воздействий пиропатронами ПВ-26 и генераторами САГ-26 наблюдаются определенные различия в вертикальном распределении образовавшихся в слоистообразном облаке полей кристаллов на частицах реагента. Так, при воздействии генераторами САГ-26 образование ледяных кристаллов на частицах реагента происходит, в основном, на уровне полёта самолёта. В случае воздействия пиропатронами ПВ-26, образование ледяных кристаллов происходит не только на уровне полёта самолёта, но и в 1,5-2 километровом слое ниже.

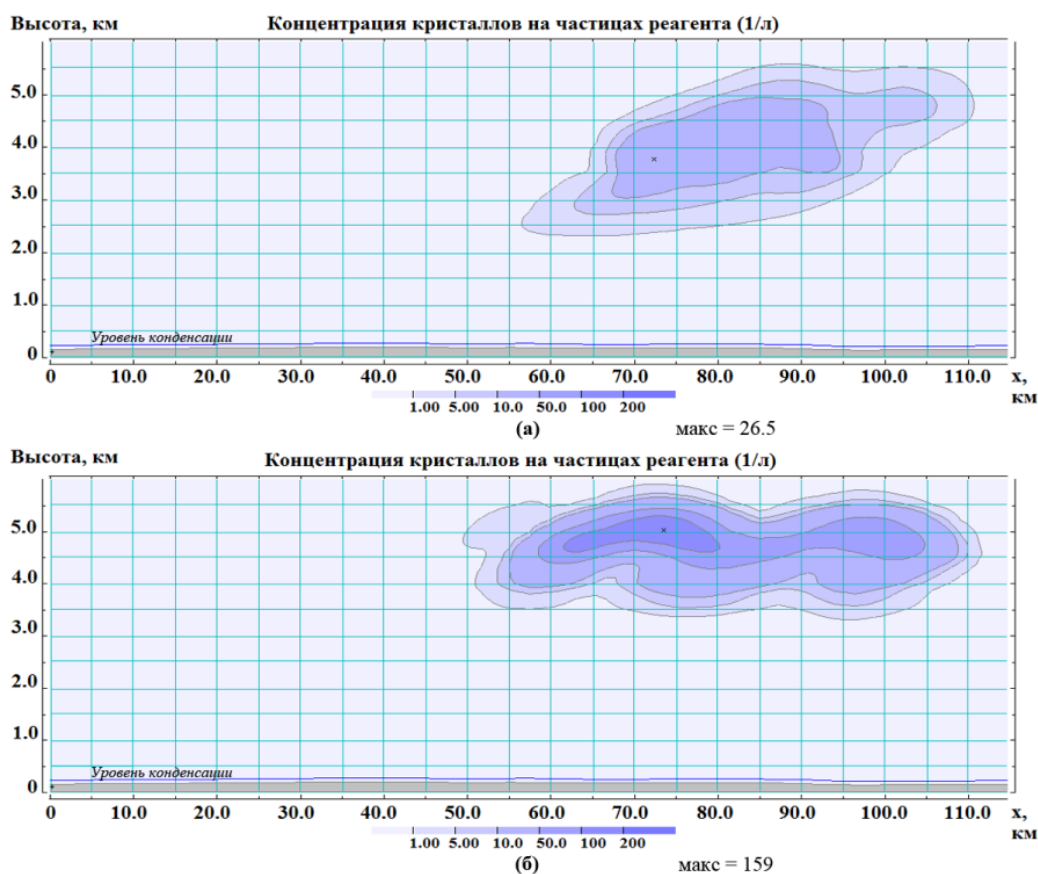


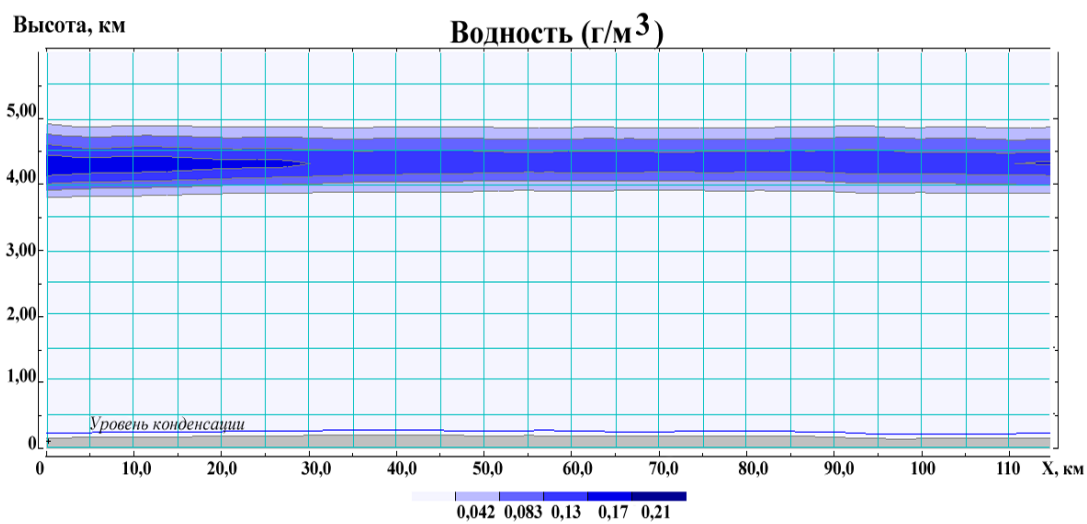
Рис. 3. Концентрация кристаллов на частицах реагента в вертикальных сечениях через 1 час после начала воздействия на уровне верхней границе облачности (5100 м): а) пиропатронами ПВ-26, б) генераторами САГ-26.

Кроме того, при проведении воздействий существуют различия, выраженные не только вертикальным распределением полей кристаллов на частицах реагента, но и значениями концентрации кристаллов на частицах реагента. Данные различия можно объяснить разными скоростями полёта самолётов при проведении воздействий. Так, при проведении воздействий генераторами САГ-26, с использованием лёгкого летательного аппарата обладающего меньшей скоростью ( $V = 120$  км/ч), значения концентраций кристаллов на частицах реагента, образовавшихся в облаке, выше (макс = 159 1/л), чем при воздействии пиропатронами ПВ-26, с использованием самолёта обладающего более высокой скоростью ( $V = 435$  км/ч) (макс = 27 1/л).

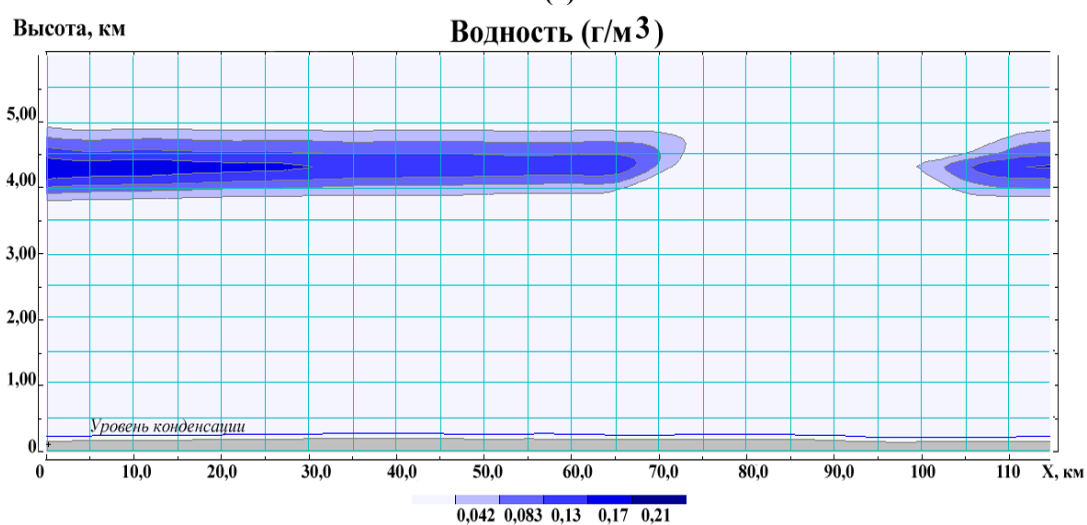
Выявленные различия в образовании и распространении полей кристаллов на частицах реагента в облаке выражаются в различиях воздействия на слой водности и являются определяющими эффективностью воздействия при проведении работ.

На рис. 4 приведены результаты расчётов водности ( $\text{г/м}^3$ ) в вертикальных сечениях при естественном развитии слоистообразной облачности, а так же через 1 час после начала воздействия пиропатронами ПВ-26 и самолётными генераторами САГ-26 на уровне верхней границы облачности (5100 м).

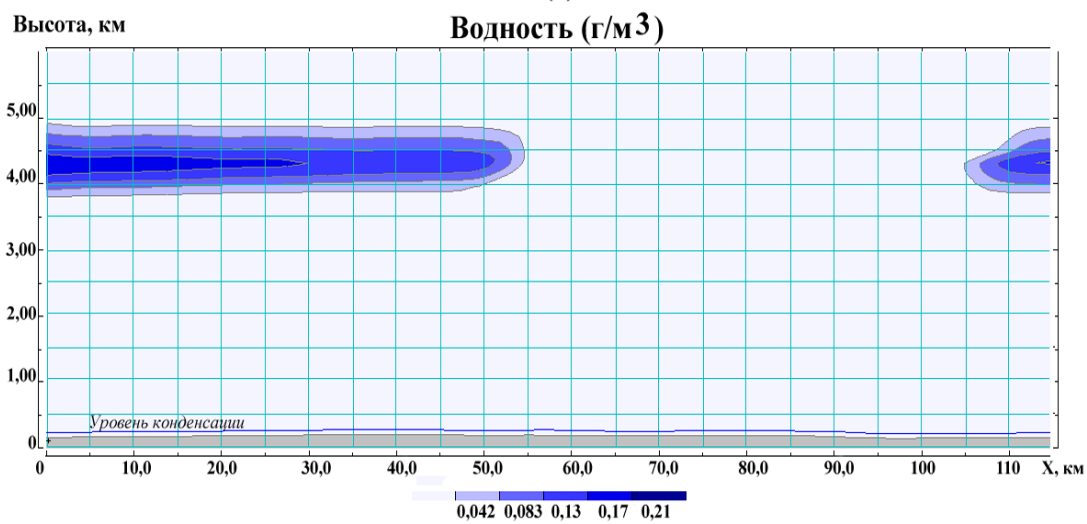




(а)



(б)



(в)

Рис. 4. Водность (г/м<sup>3</sup>) в вертикальных сечениях через 1 час:  
 а) при естественном развитии слоистообразной облачности, б) после начала воздействия пиропатронами ПВ-26, в) после начала воздействия генераторами САГ-26.

Из рис. 4 видно, что протяжённость проработки зон водности при воздействии генераторами САГ-26 практически в два раза больше, чем в случае воздействия пиропатронами ПВ-26, что может быть объяснено различными скоростями полёта самолётов при проведении воздействий. Столь значительные уменьшения значений в слое водности, полученные в результате воздействий на уровне верхней границы облака с помощью пиропатронов ПВ-26 и пиротехнических генераторов САГ-26 по сравнению с естественным развитием облака, позволяют ожидать искусственного увеличения осадков.

С целью оценки эффективности воздействий на слоистообразную облачность пиропатронами ПВ-26 с помощью самолёта Ан-26 и пиротехническими генераторами САГ-26 с использованием лёгкого летательного аппарата типа Ан-2 (ТВС-2МС) были проанализированы результаты численного моделирования интенсивности и количества осадков, полученные как при естественном развитии облачности, так и при проведении воздействий.

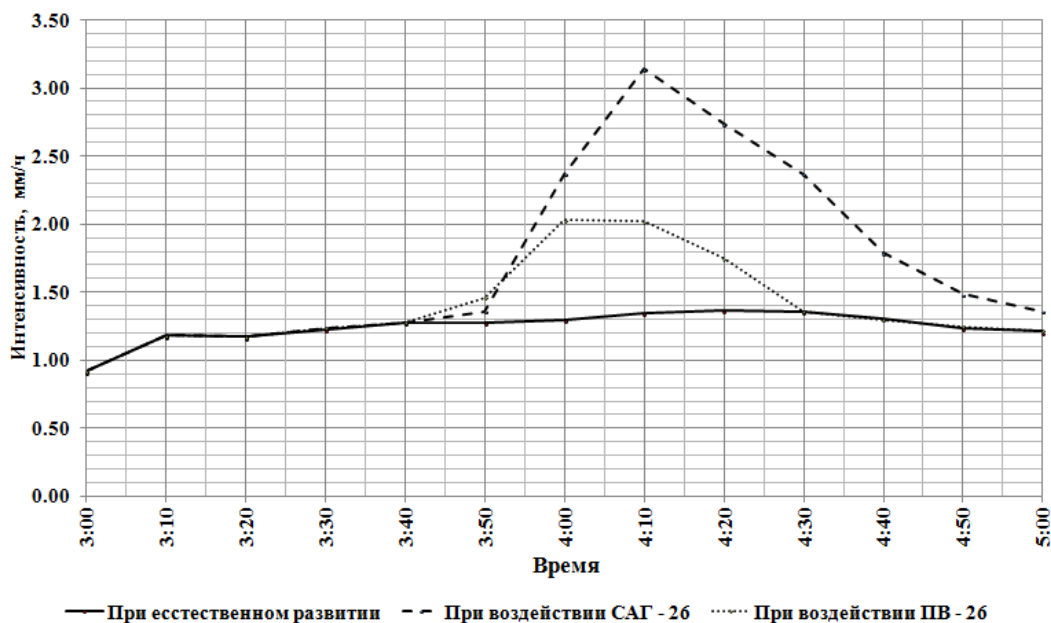


Рис. 5. Изменение интенсивности осадков (мм/ч) при воздействии ПВ-26, САГ-26 и при естественном развитии.

Из рис. 5, на котором приведен временной ход изменения интенсивности осадков, полученных в ходе выполненных воздействий, видно, что при воздействии с помощью пиропатронов ПВ-26 и генераторов САГ-26 проявление эффекта искусственного увеличения осадков начинается через 40 - 50 минут после начала воздействий и наблюдается в течение 1-1,5 часов, после чего интенсивности осадков возвращаются к уровню естественных осадков.

На рис. 6 представлен график изменения значений суммы осадков при проведении воздействий по сравнению естественным количеством осадков.

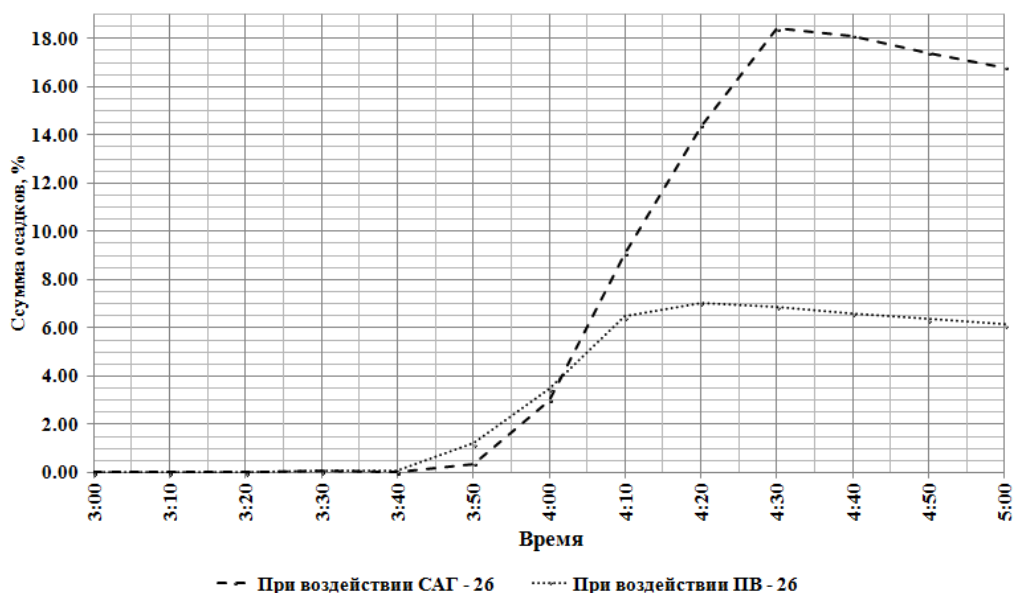


Рис. 6. Изменение суммы осадков (%) при проведении воздействий по сравнению с естественным слоем осадков.

Из рисунка видно, что максимальные значения изменения суммы осадков при воздействии пиротехническими генераторами САГ-26 достигали 18 %, а увеличение суммы осадков при воздействии пиропатронами ПВ-26 достигало 7%.

Различия в эффективности выполненных воздействий объясняются тем, что толщина слоя водности, воздействие на который приводит к эффекту искусственного увеличения осадков, ограничивается километровым слоем (рис. 3) и составляет лишь 50% от слоя, прорабатываемого, пиропатронами ПВ-26.

Таким образом, можно сделать вывод, что эффективность воздействий на наблюдавшуюся 5 мая 2014 года слоистообразную облачность пиротехническими генераторами САГ-26 с использованием лёгкого летательного аппарата по верхней границе облачности не уступает эффективности воздействия пиропатронами ПВ-26 с самолёта Ан-26.

## Выводы

1. Развитие работ по ИУО для нужд сельского хозяйства сдерживается отсутствием в России недорогих экономичных самолётов, способных выполнять работы по АВ на облака с грунтовых аэродромов, а также отсутствием во многих сельскохозяйственных регионах России необходимых для работ по АВ информационно-измерительных средств.

2. Результаты численных расчётов показали, что эффективность использования лёгких летательных аппаратов, в том числе и БПЛА, сравнима с эффективностью используемых тяжёлых самолётов, и существенно зависит от скорости летательного аппарата. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность привлечения к работам по АВ лёгких летательных аппаратов,

обладающих скоростями полёта от 120 до 150 км/час и способных выполнять полёт на высотах до 8000 метров.

3. Созданная на базе ММРЛ «КОНТУР-МЕТЕО-01» мобильная информационно-измерительная система позволяет проводить работы по ИУО как в регионах, имеющих метеорологическое радиолокационное обеспечение, так и в тех регионах, где такового отсутствует.

4. Необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования, направленные на разработку комплексов самолётных средств АВ для оборудования лёгких летательных аппаратов, позволяющих в значительной степени расширить сферу применения самолётных технологий АВ, а также разработать методику применения лёгких летательных аппаратов, в том числе и БПЛА, в работах по ИУО, что позволит проводить такие работы в местах, где ранее проведение такого рода работ было невозможным.

### *Список литературы*

1. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. – СПб, РГГМУ, 2012, 341 с.

2. Бычков А.А., Корнеев В.П., Колосков Б.П., Частухин А.В., Петрунин А.М. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействию на облака и туманы // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвящённой 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. - Нальчик, 2015 г., ч 2, с. 58-66.

3. Методические указания. Проведение работ по искусственному увеличению осадков из слоистообразных облаков. РД 52.11.646-2003. – СПб., Гидрометеиздат, 2003, 39с.

4. Бычков А.А., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Петрунин А.М., Частухин А.М., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г., Жуков В.Ю. Использование мобильного метеорологического радиолокатора «КОНТУР - МЕТЕО-01» в работах по АВ на облака. // Известия ВУЗОВ. Северо-Кавказский регион, Ставрополь, 2014, № 1, с.62 -65.

5. Бычков А.А., Колосков Б.П. Малогабаритный радиолокатор «КОНТУР-МЕТЕО-01», как средство получения метеорологической информации // Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», 2014, Том 2, ВКА имени А.Ф.Можайского, Санкт Петербург, с.34 -39.

6. Бычков А.А., Петрунин А.М., Частухин А.В. Мобильная система активных воздействий с целью искусственного увеличения осадков // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», 2016, вып. 653, ВКА имени А.Ф.Можайского, Санкт Петербург, с. 67 – 70.

7. Бычков А.А., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г., Петрунин А.М., Частухин А.В.,

Мельник С.В. Использование данных о вертикальном профиле ветра в работах по активному воздействию на облака наземными аэрозольными генераторами // Материалы III Всероссийской научной конференции «Экология и космос» им. академика К.Я.Кондратьева, посвященной году экологии в Российской Федерации, ВКА им. А.Ф.Можайского, Санкт-Петербург, 2017.

8. Горелик А.Г., Коломиец С.Ф., Щукин Г.Г. Информационные возможности ветровых профайлеров при зондировании атмосферы // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета, СПб, 2011, № 18, с. 70 - 89.

9. Готюр И.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю. В., Чернышев С.В., Щукин Г.Г. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета, СПб, № 21, 2011, с. 66 - 75.

10. Клейменова А. В. Оптимизация процесса искусственного увеличения атмосферных осадков на основе разработки технологии планирования: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.30 // Нальчик, 2015, 124 с.

11. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Клейменова А.В., Сергеев Б.Н., Шаповалов А.В., Чочаев Х.Х., Бейтуганов М.Н. Численное моделирование переноса реагента при работах по активным воздействиям на облака // Метеорология и гидрология, № 12, 2012, с. 44- 54.

## **СЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ**

**Синькевич А.А., Довгалоук Ю.А., Веремей Н.Е., Михайловский Ю.П., Попов В.Б.**

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

Слияние облаков наблюдалось при проведении самолетных натурных исследований, а позднее с помощью дистанционных средств изучения атмосферы. Исследователи отмечали, что наиболее мощные и долгоживущие кучево-дождевые облака формируются путем слияния двух или нескольких конвективных ячеек. Эти ячейки могут представлять собой мощные кучевые или кучево-дождевые облака. Развитие радиолокационной техники позволило выполнить достаточно детальные исследования процессов слияния. При этом может наблюдаться как физическое слияние облаков, так и аппаратное. В первом случае слияние обычно связано с развитием новых ячеек вблизи «материнского» кучево-дождевого облака,

во втором - программы вторичной обработки радиолокационных данных объединяют 2 облака в одно, когда отражаемость от них превосходит некоторое пороговое значение. При этом не происходит физического объединения облаков, но получаемые из радиолокационной обработки данные соответствуют характеристикам такого объединенного облака.

Целью статьи является обобщение ранее выполненных нами исследований по слиянию конвективных облаков.

### **Слияние облаков в Саудовской Аравии**

Слияние облаков наблюдалось 6 сентября 2008г. западнее г. Абха на расстоянии 70 км [2,5]. Вертикальное радиолокационное сечение облака для 4 периодов времени, характеризующих разные стадии этого процесса, приведены на рис.1. Исследуемое кучево-дождевое облако (на рис. 1 - слева) появилось на экране радиолокатора в 11 час 15 мин. Второе облако (на рис. 2 - справа) появилось на экране радиолокатора в 11 час 40 мин. В 11 час 55 мин (это время скана радиолокатора, предшествующее процессу слияния) программа вторичной обработки информации ТИТАН представляет эти облака как два отдельных облака. Из рисунка видно, что первое кучево-дождевое облако достаточно хорошо развито, его верхняя граница располагается вблизи 16 км, второе облако находится в стадии развития, но уже можно отметить появление зоны повышенной отражаемости на высоте около 7 км, где, видимо, появились крупные ледяные частицы.

Следующий рисунок демонстрирует наличие “облачного моста” - области достаточно высокой отражаемости (40dBZ), которая располагается на сравнительно небольших высотах между сливающимися облаками. Третий рисунок (12 час 15 мин) демонстрирует завершающую стадию слияния, когда из двух вершин сливающихся облаков сформировалась одна общая. Последний рисунок 12 час 25 мин показывает дальнейшее развитие облака, когда высота верхней границы вновь начала увеличиваться, достигнув 16 км. При этом хорошо видно, что слившиеся облака сформировали мощное кучево-дождевое облако. Можно предположить, что часть относительно крупных облачных частиц, которые появились и не выпали в виде осадков из первого облака, попадают во вновь сформированное облако и имеют шансы вырасти до крупных частиц осадков или града. Видимо, это является достаточно важным механизмом, ответственным за формирование из таких облаков в этом районе как крупных градовых частиц, так и очень интенсивных осадков, порой катастрофических.

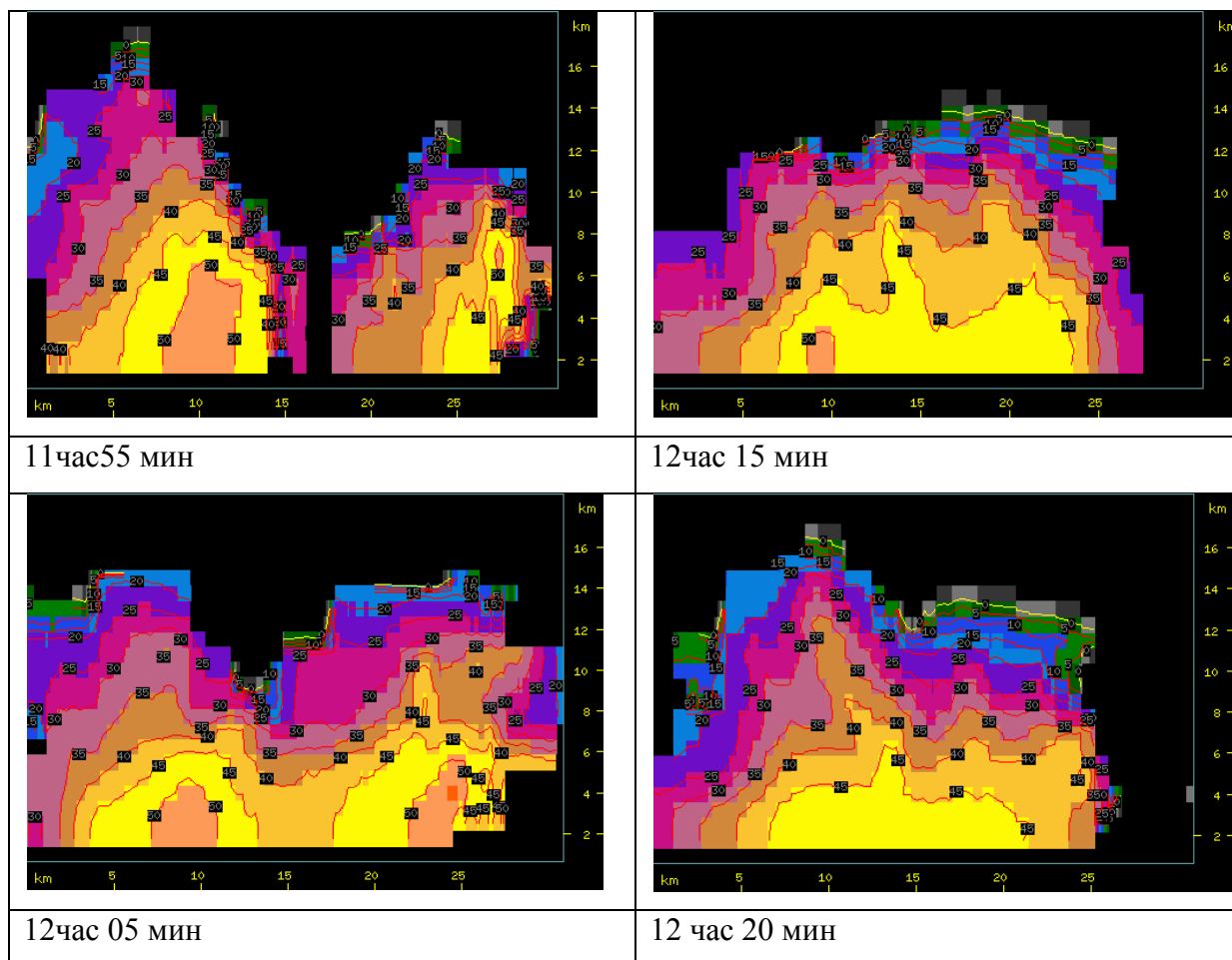


Рис.1. Вертикальное радиолокационное сечение исследуемых облаков (направление сечения запад-восток) для 4 периодов времени (6 сентября 2008 г).

### Слияние облаков в районе Санкт-Петербурга

В этом эксперименте основное внимание было уделено изменению интенсивности и потока осадков вследствие слияния облаков [4]. Исследуется слияние двух кучево-дождевых облаков, которое наблюдалось 3 августа 2015 г. Радиолокационные измерения показали, что к моменту слияния первое кучево-дождевое облако Сb1 находилось в стадии разрушения, а второе, Сb2, в стадии стационарирования.

Слияние облаков резко поменяло тенденцию измеряемых радиолокационных характеристик. Отмечается их увеличение в течение 30 минут. Резко возросла максимальная отражаемость от 48,5 дБZ (отражаемость Сb2) до 58,5 дБZ. Поток осадков из объединенного облака через 10 мин после слияния увеличился более чем в 2 раза по сравнению с суммарным потоком осадков двух облаков, от 157 до 338 м<sup>3</sup>/с. При этом максимальная интенсивность осадков от облаков в этот временной отрезок возросла с 22,0 до 47,4 мм/ч. Заметное увеличение интенсивности осадков наблюдалось к 30 мин после слияния ( $I = 89$  мм/ч). В результате слияния увеличились размеры облака: максимальная высота верхней границы и площадь. До слияния

для облаков высота верхней границы Сb1 составляла 8 км, а Сb2 - 9 км. После слияния максимальная высота верхней границы составила 9.8 км. Площадь облака увеличилась за время слияния от 110 км<sup>2</sup> (суммарная площадь двух облаков до слияния) до 164 км<sup>2</sup> (площадь облака после слияния).

Измерения осадков с помощью осадкомеров позволяют делать более надежные выводы о количестве и интенсивности осадков по сравнению с радиолокационными измерениями. Однако в связи с движением облаков осадкомеры оказываются под исследуемыми облаками относительно короткий период времени, часто они располагаются не в зоне максимальной интенсивности осадков, как в данном случае.

На рисунке 2 представлен временной ход интенсивности осадков по данным двух осадкомеров. Первый осадкомер до 10 мин находился под облаком 1, затем до 0 мин (момент времени, предшествующий слиянию) над ним проходило облако 2, после слияния осадкомер находился под объединенным облаком до 20 мин. Второй осадкомер находился на расстоянии 11.4 км от первого осадкомера по направлению перемещения облаков. Над ним с 0 по 20 мин проходило объединенное облако.

Из рисунка 2 видно, что при прохождении Сb1 над осадкомером 1 интенсивность осадков достигала 16 мм/ч. Далее осадки прекратились и возобновились в момент слияния облаков. Интенсивность осадков достигла при этом 25 мм/ч. Исследуемые облака над осадкомером 2 начали проходить в момент времени 0 мин. На 15 мин отмечен максимум интенсивности осадков (25 мм/ч), который был связан с прохождением объединенного облака. Таким образом, непосредственные измерения осадков с помощью осадкомеров подтверждают полученный выше вывод об увеличении интенсивности осадков после слияния облаков.

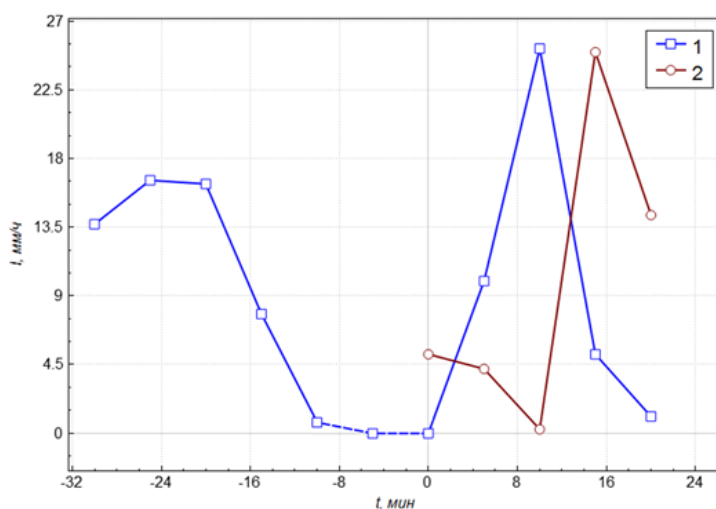


Рис.2. Зависимость интенсивности осадков от времени для осадкомера 1 и 2. Сплошной линией обозначен период времени, когда над осадкомером проходило Сb 1, пунктиром – Сb 2.



## Слияние облаков в Индии

Слияние облаков в Индии нами исследовано в районе г. Аурангабад (штат Махараштра) 12 октября 2015 г. [3]. Здесь мы приводим результаты моделирования этого процесса с использованием трехмерной нестационарной модели конвективного облака [1].

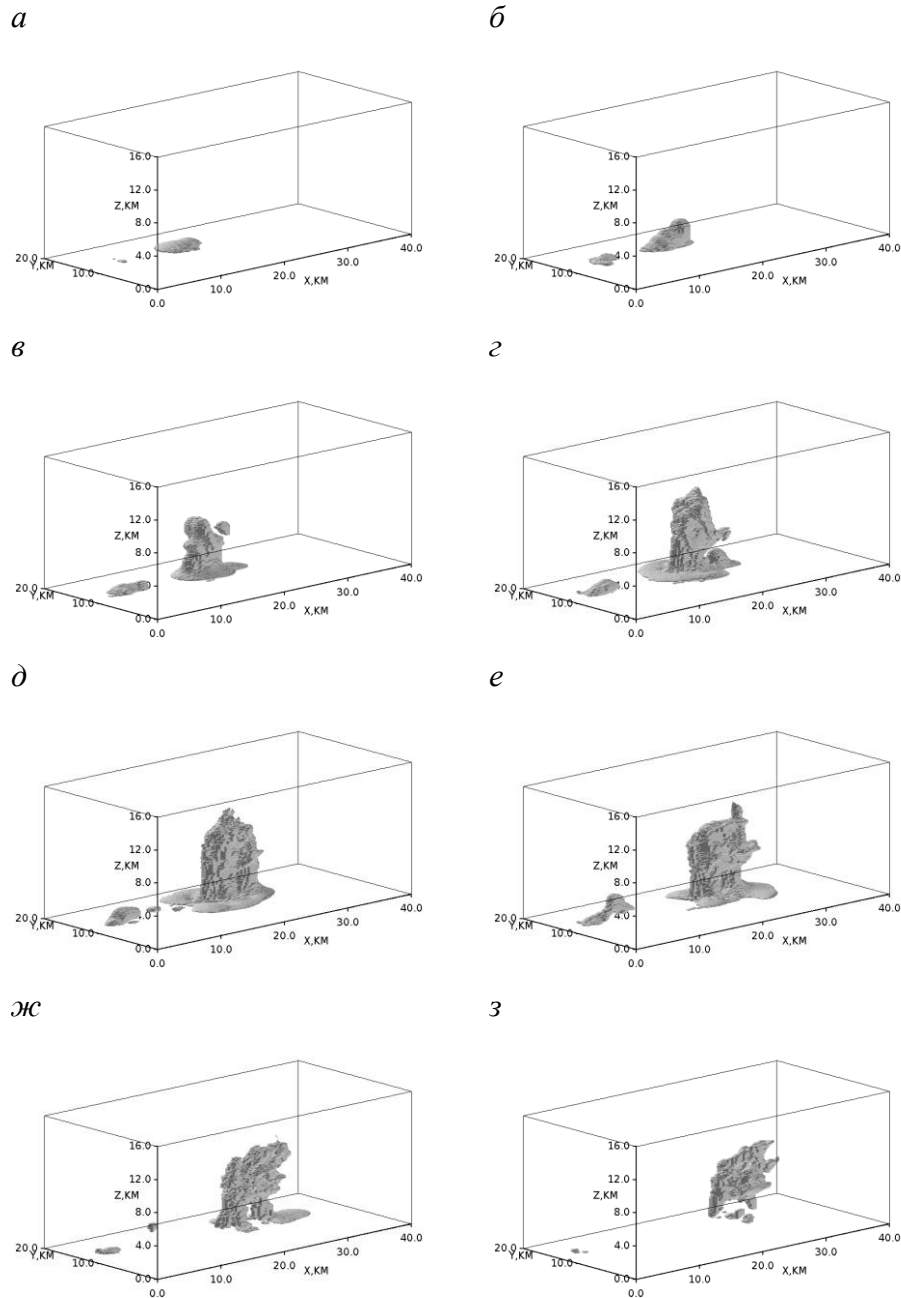


Рис.3. Трехмерное изображение поля водности облачных капель в моменты времени: а) 1000 с; б) 1500 с; в) 2000 с; г) 2500 с; д) 3000 с; е) 3500 с; ж) 4000 с; з) 4500 с. Изоповерхность 0,1 г/кг.

На рис. 3 приведено трехмерное изображение поля водности облачных капель (изоповерхность 0,1 г/кг) в разные моменты времени. Рисунки 3а-3в иллюстрируют развитие первого

облака. Второе облако начинает интенсивно развиваться правее первого (рис.3.г). Здесь просматривается возникновение облачного моста. Рисунок 3д представляет уже объединенное облако, которое постепенно разрушается (рис. 3е-3з). Небольшое облако в левой части расчетной области возникает над краем левого возмущения. Во взаимодействии вышеупомянутых облаков оно не участвует.

### **Выводы**

В результате исследований получено, что процесс слияния оказывает существенное влияние на эволюцию облаков. В объединенном облаке, по сравнению с отдельно взятым, увеличиваются скорость восходящего потока, водность, интенсивность осадков, радиолокационная отражаемость. Процесс слияния облаков способствует усилению облачной конвекции и осадкообразования.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 16-05-00197\_а, 15-05-05719\_а, 17-55-80048 БРИКС\_а, 17-05-00965\_а.

### **Список литературы**

1. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Гопалакришнан В., Михайловский Ю.П., Муругавел П., Павар С.Д., Синькевич А.А., Торопова М.Л. Численное моделирование слияния облаков с использованием трехмерной нестационарной модели облачной конвекции.//Тр. ГГО. Принято в печать, будет опубликовано в 2017г.
2. Краус Т. В., Синькевич А. А, Гхулам А.С. Радиолокационные исследования слияния облаков.// Метеорология и гидрология, 2012, N9, с42-57.
3. Синькевич А.А., Боу Б., Михайловский Ю.П., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Гопалакришнан В., Муругавел П., Павар С.Д.. Исследования эффекта воздействия на мощные кучевые облака в Индии с целью увеличения осадков.// Метеорология и гидрология. Принято в печать, будет опубликовано в 2017г.
4. Синькевич А.А., Попов В.Б., Тарабукин И.А., Дорофеев Е.В., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Михайловский Ю.П., Снегуров В.С., Снегуров А.В.. Влияние процесса слияния конвективных облаков на осадки из них и другие характеристики.//Тр. ГГО. Принято в печать, будет опубликовано в 2017г.
5. Sinkevich A.A., Krauss T.W. Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging. J. of Atmospheric Research., Volume 142, 1 June 2014, Pages 124–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres>.

## **НАТУРНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ГРАДА**

**Хучунаев Б.М., Хатефова С. Б., Хучунаев А.Б.**  
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

За последние десятилетия интенсивное развитие исследований по физике облаков, особенностей процессов осадкообразования позволили разработать методы активных воздействий (АВ) и применить их для производственной защиты сельскохозяйственных культур от града. Однако до сих пор нет исчерпывающих представлений о механизме градообразования. Град все еще выпадает на защищаемую территорию и приносит ощутимый ущерб сельскохозяйственным культурам. Это обусловлено малой изученностью процессов образования града в облаках, что приводит к необходимости дальнейших исследований механизма зарождения града для усовершенствования методов воздействия на градовые процессы.

Для разработки надежных методов активных воздействий на градовые процессы необходимо знать условия зарождение и роста града. Несмотря на интенсивное развитие в последние годы математических и дистанционных методов исследования градовых облаков, имеются пробелы в решении вопросов, связанных с типом зародышей града и условиями их роста в облаках.

Основной целью данной работы является обобщение результатов лабораторных и натуральных исследований механизма образования градин.

В ранних работах [1,2] нами приводится концепция образования града на основе натуральных и лабораторных исследований, данная работа является продолжением этих исследований.

Вкратце остановимся на основных положениях ранее проведенных исследований. В процессе роста градин в основном участвуют крупа 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 влажно растущих градин. Нами были проведены специальные исследования, посвященные данному вопросу. Это исследования пузырьковым и изотопным методами элементного состава зародышей и слоев естественных градин, совместный анализ уровней образования капельных зародышей естественных градин.

## Результаты исследования механизма образования града на основе элементного анализа

Анализ элементного состава зародышей и слоев градин позволяет решить некоторые вопросы связанные с механизмом образования града. Распределение и размер частиц из различных элементов имеет свои особенности. Так, 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 деле являются ли капельные зародыши вторичными? Нами было проведено специальные исследования по определению различных элементов в зародышах и слоях градин. Эти исследования показывают, что наиболее тяжелые элементы в большом количестве содержатся в капельных зародышах, а также, что аэрозольный состав, а, следовательно, и аэрозольная среда, в которой они росли, сильно отличается от среды, где растут крупяные зародыши и слои градин. Некоторый интерес представляет анализ отношения Na/K, так как частицы, содержащие натрий (Na), являются активными ядрами конденсации, капли на таких частицах образуются при 75% влажности, а калий (K), как отмечалось, является пассивной примесью. Результаты проведенных исследований Na/K показали, что это соотношение для капельных зародышей на порядок больше, 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 не различались бы так сильно.

Это приводит нас к выводу, что капельные зародыши не образовались в результате таяния крупы или срыва капель с мокро растущих градин.

С.М. Шметер в своих исследованиях [3] показал, 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 нашим данным 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 показали, что кроме капельных зародышей во всех слоях и крупяных зародышах обнаружено содержание Ag. Если учесть то, что активные воздействия проводились на навес радиоэха, 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 приведенных выше исследований показывают, что элементный состав, а, следовательно, аэрозольная среда в которой растут капельные зародыши, значительно отличаются от среды, где растут крупяные зародыши и слои градин, что капельные зародыши в градобитиях Северного Кавказа не могли образовываться в результате срыва капель с мокро растущих градин, а также путем таяния крупы.

### **Пузырьковый и изотопный методы исследования 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 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, когда капли образовались по механизму теплого дождя в низких слоях облака и кристаллизовались во время подъема в восходящем потоке, температура, определенная по изотопному составу, будет выше, а во всех других случаях - ниже истинной температуры кристаллизации. Из 21 исследованных капель зародышей 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 и невозможно определить, как они образовались.

### **Результаты лабораторного моделирования образования крупы и роста града на капельных и крупяных зародышах**

Результаты лабораторного моделирования начальной стадий роста града показали, что скорость роста агрегатов кристаллов описывается эмпирической формулой:

$$V_p = 12N \exp(-0,25+0,12N-0,37t+0,541g), \quad (1)$$

где  $V_p$  - скорость роста агрегатов кристаллов,  $N$  – концентрация кристаллов в камере,  $t$  – температура,  $g$  – водность.

С увеличением водности увеличивается скорость роста крупы. Заметная агрегация кристаллов начинается с концентрации кристаллов  $10^4 / \text{м}^3$ , с увеличением концентрации увеличивается скорость роста. Результаты экспериментальных исследований роста града на капельных и крупяных зародышах показывают, что рост града можно описать формулой:

$$R = R_0 + \frac{E[R]}{4\rho_l} W q \Delta t, \quad (2)$$

где  $R_0$  – первоначальный радиус градины,  $q$  – водность облака,  $W$  – скорость воздушного потока в камере.

При росте града на крупных зародышах четкой зависимости между коэффициентом роста ( $K = \frac{E(R)\rho_B}{\rho_L}$ ) и водностью не наблюдается. Это связано с тем, что рыхлая структура, какой является крупа, при захвате крупных капель не успевает закристаллизоваться, затягивается внутрь как в капиллярах. При маленьких водностях 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 водности нижний слой градины начинает впитывать воду, и коэффициент роста становится отрицательным или же рост не значителен.

В некоторых случаях при больших водностях 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. Количество 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, приведенную на рисунке. На схеме можно выделить три возможных механизма образования града. Первое образование крупных и капельных зародышей – рост слоев. Второе образование кристаллов-агрегатов кристаллов – пропитка – крупа, параллельно образование капельных зародышей – рост слоев, образование града. Третий механизм образования кристаллов – агрегаты – пропитка агрегатов – кристаллизация – град.

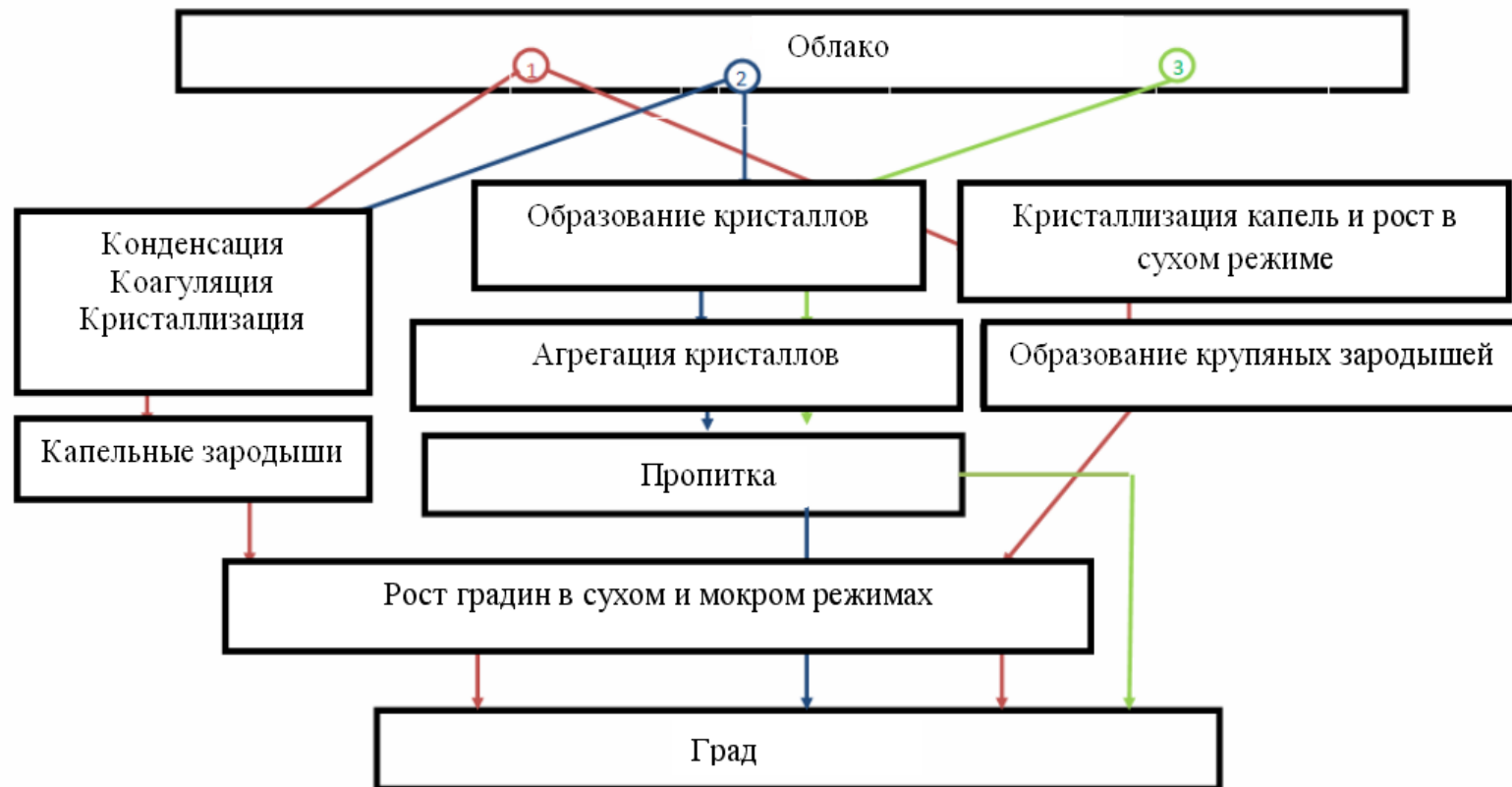


Рис.1. Схема роста града.

1 - первый механизм образования града, 2 - второй механизм образования града, 3 – третий механизм образования града

Образование града по первому механизму – это общепринятый 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 значительно больше, 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 крупных 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, влажность в облачной среде возрастает, и 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. 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 образуется град. Реализация данного механизма приводит к образованию больших бесформенных градин.

Приведенная выше схема роста градин получена на основе лабораторных и натуральных исследований градин. Для привязки ее к конкретным градовым процессам воспользуемся радиолокационным снимком вертикального среза градового облака приведенного в [4] (рис. 2.).



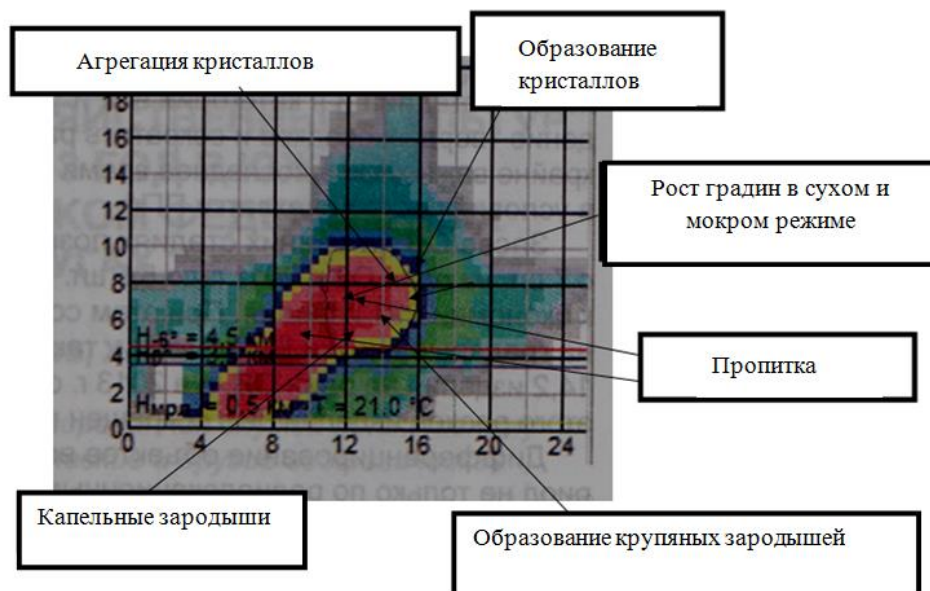


Рис. 2. Места зарождения и роста града.

По структуре ветра вертикальное сечение можно разбить на три зоны. Первая зона, где направление восходящих потоков вертикально, в этой зоне справа - зона образования кристаллов и рост крупных зародышей града. При достижении концентрации кристаллов  $10^4$  частиц на  $m^3$  и более начинается процесс агрегации кристаллов, левее внизу находится зона образования капельных зародышей, выше него - зона пропитки и роста града.

Вторая зона - это зона выпадения осадков, в этой зоне градины под действием горизонтальной составляющей скорости восходящих потоков отклоняются от вертикального движения, в данном случае отклонение составляет около  $45^\circ$ . Эта зона является еще одной зоной пропитки и роста. В этой зоне холодные градины встречаются с относительно теплым воздушным потоком, что приводит к ускорению процессов конденсации и коагуляции. В этой же зоне происходит сепарация градин, аэродинамически более легкие градины уносятся далеко в левую сторону зоны выпадения градин, снос тяжелых градин относительно незначителен. В третьей зоне нет восходящих потоков, и градины падают вертикально. Непосредственно у поверхности земли обычно наблюдается еще одна небольшая зона, где воздушные потоки направлены слева на право. Такая структура потока приводит к тому, что у поверхности земли с правой стороны градовой дорожки выпадает самый крупный град и здесь доля капельных зародышей градин максимальна, с левой стороны градовой дорожке выпадает мелкий град и в этих градинах доля крупных зародышей максимальна. В отдельных случаях, когда влияние приземного ветра значительно, с правого края градовой дорожки наблюдается двухмодальный вид распределения градин по размерам.

### **Список литературы**

1. Хучунаев Б.М., Хучунаева С.Б., Хучунаев А.Б. Концепция механизма образования града на основе натуральных и лабораторных исследований//Доклады всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 7-9 октября 2014г. – ч.1- С.204-213.
2. Хучунаев Б. М., Хучунаева С. Б., Хучунаев А. Б., Куповых Г.В. Результаты натуральных и лабораторных исследований механизма образования града // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. № 6. 2014. С. 44–48.
3. Шметер С. М. О содержании хлора в воде облаков в связи с их микроструктурой// Труды ЦАО. 1955.- Вып. 9.- С. 57.
4. Лозовой В.И., Акимова И.И. Активные воздействия на градовые облака на территории Ставропольского края//Доклады всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 7-9 октября 2014г. - ч.2 - С.108-123.

## **ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ОБЛАЧНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ**

**Кашлева Л. В.<sup>1</sup>, Михайловский Ю.П.<sup>2</sup>, Михайловский В.Ю.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> РГГМУ, г. Санкт-Петербург; <sup>2</sup>ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», г. С.-Петербург;  
<sup>3</sup>СПбГУ, г. Санкт-Петербург

### **Введение**

Электризация частиц облака и осадков в грозовых облаках – чрезвычайно важный аспект исследований физики облаков. Экспериментально и давно было показано, что значительная электризация как частиц в облаках, так и самих облаков в умеренных широтах возможна лишь когда в облаке не просто появились кристаллы, но облако достигло высоты интенсивной электризации. Решающая роль твердой фазы для электризации облаков очевидна. В результате столкновения и разрушения контакта крупных ледяных частиц, крупинок или градин, с облачными кристаллами и переохлажденными капельками происходит их взаимная электризация. Заряд, приобретаемый градиной (его знак, и величина), зависит от температуры и водности облачной среды.

Представлен обзор результатов лабораторных исследований электризации гидрометеоров в облаке. Рассмотрены механизмы электризации облачных гидрометеоров при взаимодей-

ствии твердых частиц осадков с облачными кристаллами и переохлажденными каплями в различных температурных режимах в кучево-дождевом облаке и предложена схема параметризации процессов разделения зарядов при взаимодействии частиц облака и осадков.

### **Электризация крупинки (или градины) в результате столкновении с нею облачных кристаллов**

Пожалуй, наиболее изученный из механизмов электризации облачных частиц - электризация крупинки (или градины) в результате столкновении с нею облачных кристаллов. И не случайно. Этот процесс активно работает выше уровня интенсивной кристаллизации и его во многом определяющая роль в процессе электризации облака очевидна.

Отскок кристалликов льда при их столкновении с крупной ледяной частицей – крупинкой или градиной, приводит к взаимной электризации столкнувшихся частиц. Величина и знак разделяющегося заряда  $\Delta q_{л-л}$  определяются процессами в квазижидком слое, возникающем в зоне контакта [16]. Однако до настоящего времени нет развитой теории электризации ледяных частиц, происходящей в результате их столкновения, которая объясняла бы все наблюдаемые эффекты. Перечислим основные факторы, влияющие на заряджение частиц.

Знак заряда градины, приобретаемого ею в результате столкновения с ней ледяных кристалликов, зависит от водности и температуры в среде. В [11] было выдвинуто предположение, что знак приобретаемого градиной заряда зависит от режима ее роста. Подробно этот вопрос исследовался в работе [28]. Результаты свидетельствуют о том, что заряд, разделяющийся в мокром режиме роста градины, на порядок меньше заряда, разделяющегося в сухом режиме роста. Это позволяет сделать вывод, что заряджение градин в мокром режиме едва ли может играть важную роль в электризации гроз. Примеси, меняющие поверхностные свойства льда, в том числе его электрокинетический потенциал, также влияют на электризацию. Так, в присутствии примесей хлорида натрия меняется не только вид зависимости заряджения от водности и температуры, но и знак заряда [27].

В [24] было выдвинуто предположение, что величина разделяющегося заряда определяется площадью контакта сталкивающихся частиц и, следовательно, зависит от размера кристаллика  $d_{л}$  и скорости его столкновения  $v_{ст}$  с градиной. Большинство исследователей, считая коэффициенты взаимодействия частиц постоянными, получили, что заряд, разделяющийся при столкновении частиц, пропорционален  $(v_{ст})^4$ . При скорости столкновения, меньшей некоторого порогового значения, электризация отсутствует. Для частиц диаметром  $d_{л} = 10$  мкм пороговое значение  $v_{ст}$  составляет 4 м/с.

В [37] был проведен анализ зависимости  $\Delta q_{л-л}$  от  $d_{л}$ . Авторы считают, что, поскольку во всех опытах значения скорости столкновения, температуры, размеров кристаллов и условия

роста льда были различны, строгой зависимости и полного совпадения ожидать нельзя. Они предложили приближенную формулу для интервала размеров  $10\text{мкм} \leq d_{\text{л}} \leq 300\text{мкм}$ :

$$\Delta q_{\text{л-л}} = cd_{\text{л}}^2 \quad (1)$$

где  $c = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot \text{м}^2$ .

На рис. 1 нанесены данные, приведенные в [37], данные более поздних работ и проведена линия III по формуле (3). Из рисунка видно, что предложенная в [37] формула удовлетворительно согласуется с более поздними результатами. Для кристаллов  $d_{\text{л}} \geq 300\text{мкм}$  формула (3) не выполняется. Такой результат можно было ожидать, поскольку кристаллы больших размеров имеют неправильную форму, следовательно, при их столкновении с градиной зона контакта в меньшей мере определяется размером частиц.

### **Электризация крупинки (или градины) в результате столкновении с ней переохлажденных облачных капель**

При столкновении с градиной (или крупинкой) переохлажденных капель происходит разрушение капель, сопровождающееся разделением заряда. Этот процесс кардинально различается в зависимости от того, каким образом разрушается капля: в результате раскалывания при замерзании капли на поверхности градины или в результате разбрызгивания капли и ее частичного намерзания на градине. Заряды, приобретаемые градиной в том или ином процессе, различаются не только по величине разделяющегося заряда; но и знак заряда, приобретаемый градиной, зависит от того, каким образом протекало разрушение капли.

*а. Электризация при разбрызгивании переохлажденных капель на крупной ледяной частице.*

Разбрызгивание и частичное намерзание переохлажденных капель на крупной ледяной частице сопровождается разделением зарядов. Этот механизм изучался в работах [7, 15, 23, 36, 44, 45]. Как считают исследователи этого процесса, разделение заряда происходит в результате 1) дробления капель, и 2) кристаллизации воды на поверхности льда. Вероятным фактором, определяющим происходит ли разбрызгивание или взрывание переохлажденной капли при ее столкновении с градиной, является режим роста градины. Если градина растет в мокром режиме, то, при столкновении с ней, капли разбрызгиваются.

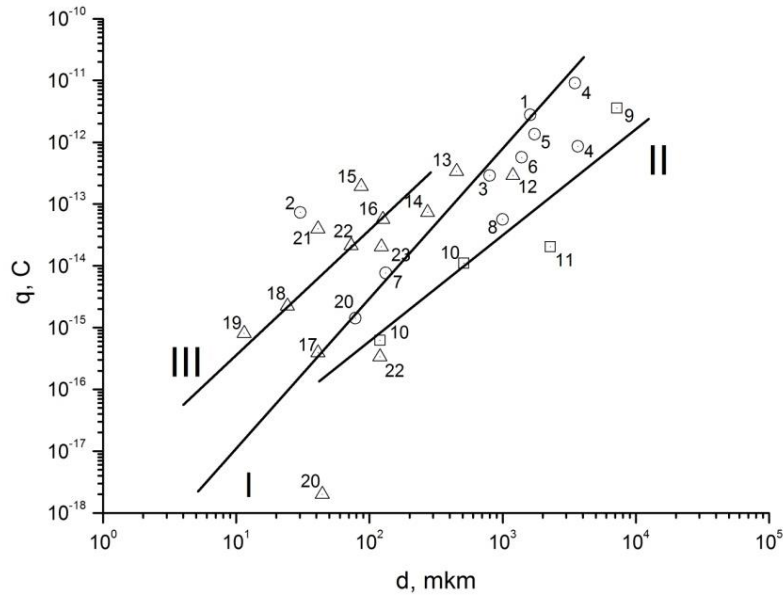


Рис. 1. Заряды, приобретаемые градиной в результате столкновения с нею облачных кристалликов и капель, по экспериментальным работам разных авторов: I (○) – взрыв кристаллизующихся капель (спонтанно или при ударе о ледяную поверхность), II (□) – разбрызгивание ледяных капель на градине, III (Δ) – столкновение и отскок ледяных частиц. 1- [10], 2-[25], 3-[40], 4 –[15], 5 –[23], 6-[43], 7-[25], 8-[4], 9-[44], 10-[45], 11-[36], 12-[33], 13-[34], 14-[35], 15-[41], 16-[18], 17-[21], 18-[19], 19-[37], 20-[33], 21-[41], 22-[31], 23-[24].

Опыты проводились с частицами, имитирующими градины, установленные в аэродинамической трубе или на вращающемся коромысле в облачной камере. Была обнаружена зависимость заряжения от скорости столкновения, температуры и размера переохлажденных капель. Опыты проводились для капель  $40 \text{ мкм} \leq d_k \leq 125 \text{ мкм}$ . Знак заряда ледяной мишени зависит от состава примесей [45]. В результате разбрызгивания переохлажденной капли чистой воды градина заряжается положительно. При разбрызгивании капель раствора NaCl градина заряжается отрицательно, при разбрызгивании капель раствора  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – положительно. В экспериментах, прежде всего, была обнаружена зависимость заряжения от размеров переохлажденных капель, а также от скорости столкновения капель с градиной и температуры капель. Для исследования зависимости заряда  $\Delta q_{\text{разб}}$ , разделяющегося при разбрызгивании капель на поверхности градины, от размера капель были использованы результаты работ [36, 44, 45]. Несмотря на неизбежное расхождение значений, полученных разными авторами в разных условиях, удалось найти осредненную зависимость величины разделяющегося заряда от размера капли чистой воды (см. рисунок 1, линия II). Эта зависимость может быть описана следующей приближенной формулой:

$$\Delta q_{\text{разб}} = b d_k^{1.7} \quad (2)$$

где  $b = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-1.7}$ .

Подчеркнем, что формула получена при использовании результатов экспериментов с каплями чистой воды.

*б. Электризация при замерзании, деформации и раскалывании переохлажденных капель.*

Замерзание переохлажденной капли нередко приводит к ее деформации и раскалыванию. В результате взрывания замерзающей капли образуются ледяные осколки, иногда выбрасывается сплинтер незамерзшей воды. Этот процесс сопровождается разделением зарядов [9, 10, 25, 40, 45]. Исследования показали, что электризация происходит за счет кристаллизации воды. Отметим, что в экспериментальных работах по разделению зарядов в результате взрывообразного разрушения замерзающих капель приводятся неоднозначные, иногда противоречивые данные. Но при обобщении можно прийти к выводу, что ледяные осколки, образующиеся в результате спонтанного взрывания капли, обычно заряжаются положительно, незамерзшая вода – отрицательно. Если взрывание капли происходит в результате ее столкновения с градиной и вода намерзает на поверхности градины, то градина заряжается отрицательно. При этом, очевидно, можно выдвинуть предположение, что взрывание переохлажденных капель происходит только в том случае, когда градина растет в сухом режиме.

Значения зарядов  $\Delta q_{вз}$ , разделяющихся при взрывообразном разрушении замерзающих капель, в работах разных авторов различаются на несколько порядков, что неизбежно при существующем несовпадении в условиях экспериментов. Для анализа, используя уже предложенный подход, была предпринята попытка [11] найти зависимость величины разделяющегося заряда от размеров взрывающихся капель. Эта зависимость величины разделившегося заряда  $\Delta q_{вз}$  может быть выражена следующей приближенной формулой:

$$\Delta q_{вз} = ad_k^{2.4} \quad (3)$$

где  $a = 0,9 \cdot 10^{-5}$  Кл·м<sup>-2.4</sup>.

Изучению этого вопроса было посвящено много теоретических исследований. Ссылки на них можно найти в [4, 14, 10].

Сравним эффективность электризации градины при разрушении на ее поверхности переохлажденных капель (см. рисунок 1). Видим, что электризация при взрывании капель является наиболее мощным механизмом микроэлектризации. Подчеркнем, что определяющим фактором, происходит ли при столкновении переохлажденной каплей ее разбрызгивание или взрывание, является, по-видимому, режим роста градины. Неучет режима роста града может привести к значительному завышению скорости электризации облака при формировании облачного диполя и даже к искажению результатов расчета с помощью численной модели. Это замечание можно отнести к результатам моделирования электрической активности облаков в [1, 5, 6].

### *Список литературы*

1. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Кулиев Д.Д., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития. //Известия Вузов. Радиофизика. 2013, т. LVI, N 11-12, стр. 1-9.
2. Баранов В.Г. Особенности формирования электрической структуры конвективного грозового облака по данным численной нестационарной модели. /Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Л., 1990. – 14 с.
3. Башкирова Г.М., Молоткова И.А. К вопросу о разрушении капель при замерзании. //Тр. ГГО, 1981, вып 439, с. 55-68.
4. Бурчуладзе Н.Н., Громова Т.Н., Никандров В.Я., Першина Т.А., Шишкин Н.С. Экспериментальные исследования роли замерзания и разрушения облачных элементов в электризации конвективного облака. //Тр. ГГО, 1982, вып.457, с.141-148.
5. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Морозов В.Н. О параметризации микрофизических процессов в численных моделях грозовых облаков. //Метеорология и гидрология. 2006, N 11, с.5 - 18.
6. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Гопалакришнан В., Комаровских К.Ф., Муругавел П., Парвар С.Д., Синькевич А.А. Численное моделирование влияния сильного аэрозольного загрязнения атмосферы на динамику электрической структуры кучево-дождевого облака.// Метеорология и гидрология, 2015, №12. – С. 5 – 18.
7. Евтеев Б.Ф. Основные закономерности электризации тел, движущихся в потоке капель. Экспериментальное исследование. /Автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.ф.-м.н. Л., 1978, 22 с.
8. Имянитов И.М. Строение и условия развития грозовых облаков. //Метеорология и гидрология, 1981. № 3. С. 5-17.
9. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л. Гидрометеоиздат, 1990.
10. Качурин Л.Г., Бекряев В.И. Исследование процесса электризации кристаллизующейся воды. //ДАН СССР, 1960, т.130, № 1, с.57-60.
11. Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П., Михайловский В.Ю. Механизмы электризации
12. Кашлева Л.В. Атмосферное электричество. Учебное пособие. – СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 116 с.
13. Михайловский Ю.П. О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации. //Труды ГГО, вып. 580, 2016, ООО "Д'АРТ", с.125-138.

14. Михайловский Ю.П., Кашлева Л.В. Методика и результаты исследований электризации конвективных облаков с помощью самолетов./Сборник трудов «Радиолокационная метеорология и активные воздействия», ГГО, С-Пб., 2012, стр.98-114
15. Мучник В.М. Физика грозы. Л., Гидрометеиздат, 1974, 351с.
16. Мучник В.М., Фишман В.Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. Л., Гидрометеиздат, 1982, 207с.
17. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. - Гидрометеиздат, 1974, 334 с.
18. Aufdermaur A.N., Johnson D.A. Charge Separation Due to Riming in the Electric Field.// Quart. J. Roy. Met. Soc., 1972, v.98, pp. 369-382.
19. Buzer O., Aufdermaur A.N. Electrification by Collision of Ice Particles on Ice or Metal Targets. Steinkopf, pp. 294-300.
20. Chou C.S. Numerical Study of Cloud Electrification in an Asymmetric Time-Dependent Cloud Model. //J. Geoph. Res., 1978, v.83, pp. 5025-5049.
21. Church C.P. The Electrification of Hail. Ph. D. Thesis, Univ. Durham, England, 1966.
22. Evans D.J., Hatahinson W.C.H. The Electrification of Freezing Water Droplets and Particles. //Quart. J. Roy. Met. Soc., 1963, v.89, No 381, pp. 370-375.
23. Gaskell W. A Laboratory Study of Thunderstorm Electrification. //Quar. J. Roy. Met. Soc., 1981, v. 107, n. 450, pp. 955-966.
24. Gaskell W., Illingworth A.J. Charge Transfer Accompanying Individual Collisions between Ice Particles and Its Role in Thunderstorm Electrification. //Quar. J. Roy. Met. Soc., 1980, v. 106, n. 450, pp.841-854.
25. Hallet J., Saunders C.P.R. Charge Separation Associated with Secondary Crystal Production.// J. Atm. Sci., 1979, v. 36, pp. 2230-2235.
26. Illingworth A.J., Latham J. Calculations of Electric Field Growth, Field Structure and Charge Distributions in Thunderstorms. //Quart. J. Roy. Met. Soc., 1977, v.103, No 436, pp. 281-297.
27. Jayaratne E.R., Saunders., Hallet J. Laboratory Studies of the Charging of Softail During Ice Crystal Interactions. //Quart.J. Roy. Met. Soc., 1983, v. 109,pp. 609-630/
28. Jayaratne Rohan, Clive Saunders. Wet Hail and Thunderstorm Electrification . XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A.
29. Klimin, N. N., Kashleva L.V. Collision Efficiency of Cloud Droplets in the Presence of Electric Field. Prec. of 16th International Conference on Clouds and Precipitation, Leipzig, 2012
30. Krehiebl R.P., Brook M., Lhermitte R.L., Lennon C.I. Lightning Charge Structure in Thunderstorms. VIth Int. Conf. Atm. Elect., Manchester, 1980.



31. Latham J. The Electrification of Thunderstorms. //Quar. J. Roy. Met. Soc., 1981, v. 107, pp. 277-289.
32. Latham J., Mason B.J. Generation of Electric Charge Associated with the formation of Soft Hail in Thunderstorms. Proc. Roy. Soc., 1961, A260, pp/ 537-549.
33. Latham J., Miller A.H. The Role of Ice Specimen and Impact Velocity in the Reynolds-Brook Theory of Thunderstorm Electrification. J. Atm. Sci., 1965, v.22, pp. 505-508.
34. Latham J., Montagne J. The Possible Importance of Electrical Forces in the Development of Show Cornices. J. Glaciol., 1970, v.9, pp. 375-385.
35. Latham J., Stow C.D. A Laboratory Investigation of the Electrification of Show-Storms. //Quart. J. Roy. Met. Soc., 1967, v.93, pp. 55-68.
36. Latham J., Warwicker R. Charge Transfer Accompanying the Splashing of Supercooled Raindrops on Hailstone. //Quar. J. Roy. Met. Soc., 1980, v. 106, pp.559-568.
37. Marshall B.J.P., Latham J., Saunders C.P.R. A Laboratory Study of Charge Transfer Accompanying the Collision of Ice Crystals with a Simulated Hailstone. //Quar. J. Roy. Met. Soc., 1978, v. 104, pp.163-178.
38. Mikhalovskii Yu.P., Kashleva L.V., Mikhalovskii V. Yu. Phenomenon of “warm thunderstorm”. Prec. of 16th International Conference on Clouds and Precipitation, Leipzig, 2012.
39. Mason B.J., Maybank J. The Fragmentation and Electrification of Freezing Water Drops. //Quart. J. Roy. Met. Soc., 1960, v.86, No 368, pp. 176-186.
40. Mossop S.C. The Influence of Drop Size Distribution on the Production of Secondary Ice Particles During Graupel Growth. //Quar. J. Roy. Met. Soc., 1978, v. 104, pp.323-330.
41. Reynolds S.E., Brook M., Lourley P.M. Thunderstorm Charge Separation.//J. Met., 1957, v.14, pp. 426-436.
42. Saunders C. Charge Separation Mechanisms in Clouds. //Space Sci Rev, 2008, v. 137, pp. 335–353
43. Scott D., Hutchinson W.C.H. The Electrification of Freezing Water Drops. //Quart. J. Roy. Met. Soc., 1965, v.91, No 387.
44. Shewchuk S.P., Aribert J.V. Charge Separation During Splashing of Large Drops on Ice. //Quar. J. Roy. Met. Soc., 1971, v. 97, pp.272-282.
45. Shewchuk S.P., Aribert J.V. Electrification Associated with Droplet Accretion on Ice. //Quar. J. Atm. Sci., 1974, v. 31, pp.777-786.
46. Takahashi T. Riming Electrification as a Charge Separation Mechanism in Thunderstorms.// J. Atm. Sci., 1978, v. 35, pp. 1536-1548.
47. Williams Earle R. The Tripole Structure of Thunderstorms.// Journal of Geophysical Research, v 94, NoD11, p. 113151-13167.

48. Worrman T.J. Atmospheric Electrical Effects Resulting from the Collision of Supercooled Water Drops and Hail. The Physics of Ice/ Ed by Richl, Bullemer and Engelhard. 1969, pp/1652-1661.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЬДООБРАЗУЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ АЭРОЗОЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ НАХОЖДЕНИИ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ**

**Шилин А.Г., Иванов В.Н., Савченко А.В., Андреев Ю.В.**

ФГБУ «НПО «Гайфун», г. Обнинск

### **Введение**

В настоящее время противогородовые работы проводятся в 48 странах мира (68 противогородовых проектов), причем суммарная площадь защищаемых территорий превышает 86 млн. га. Тем не менее, несмотря на прогресс в области развития противогородовых средств, суммарный ущерб от градобитий неуклонно возрастает. Если проанализировать динамику ущерба, причиняемого градowymi штормами, в регионах и странах, предоставляющих корректную статистику, то можно констатировать неуклонное его возрастание.

Например, для США для периода наблюдений 2000-2016 гг., в то время как средняя величина сельскохозяйственного ущерба остается относительно постоянной и составляет около 100 млн. USD в год, ущерб имущества при средней величине 1,163 млрд возрастает ориентировочно на 50 млн. USD в год. При этом травмы и увечья за 15 лет получили 305 человек (20 человек в год). На рисунке 1 представлена динамика экономического ущерба (сельскохозяйственного и промышленного) в США от града за период с 1990 г. по 2016 г.

Возрастание ущерба в городах очевидно связано как с увеличением мощности и энергии градowych процессов, так и с увеличением плотности населения, стоимости имущества и инфраструктуры. Градowych процессы с ущербом более 1 млрд. USD и 50 пострадавших за последние 15 лет в мире имели место: St. Louis (Missouri), Oklahoma City (Oklahoma) – USA, Henan Province – China, Southern Germany, Brisbane (Australia) [2].

Характерно, что средства, эффективные для воздействия на градовые процессы над промышленными центрами и мегаполисами практически отсутствуют: использование ракетно-артиллерийских систем, даже если они разрешены на территории страны, в данных случаях недопустимо, использование самолетов в случае градового шторма высокой интенсивности или в ночное время вряд ли возможно вследствие высокой опасности полетов. Единственным средством, возможным для использования в этой ситуации являются наземные генераторы, однако их эффективность в настоящее время не слишком высока. Одной из причин этого является длительное время нахождения аэрозоля, образованного наземным генератором, в атмосфере до попадания в целевую зону, в результате чего имеет место значительное снижение льдообразующей активности.

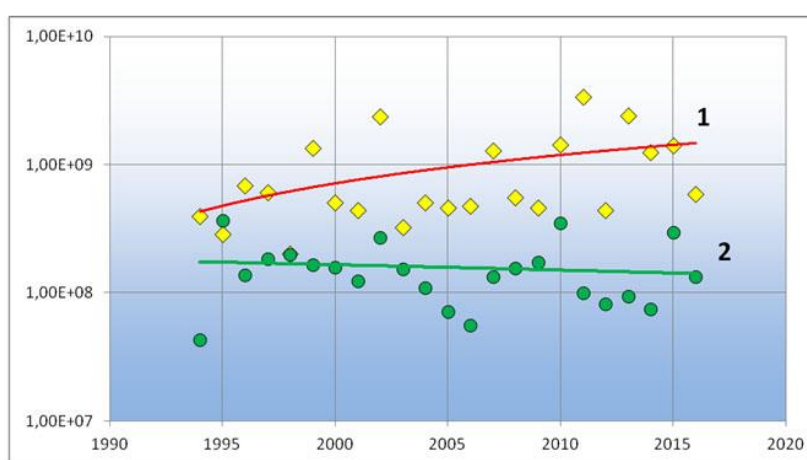


Рис. 1. Ущерб от градобитий в США: 1 – сельскохозяйственный ущерб, 2 – индустриальный ущерб [1].

Работы по исследованию динамики льдообразующей активности при нахождении аэрозоля в среде с различной влажностью и воздействием УФ-излучения проводились нами и ранее, однако исследования проводились в аэрозольных камерах относительно небольшого объема, поддерживать заданные характеристики среды и состояние аэрозоля в которых в течение длительного времени было невозможно. В данной работе рассмотрены процессы изменения льдообразующей активности и физических характеристик аэрозолей  $AgI$ ,  $Ag_3CuI_4$  и флороглюцина, образованных генераторами различных типов, при выдержке в целевой среде в течение длительного, до трех суток, времени.

### Методика эксперимента и оборудование

Эксперименты проводились в большой аэрозольной камере (БАК) объемом  $3200 \text{ м}^3$  корпуса модельных установок ФГБУ «НПО «Тайфун». Перед проведением эксперимента в камере создавалась среда с заданной относительной влажностью 35, 60 и 90%, камера выдерживалась некоторое время для выравнивания температуры стенок и объема камеры, после чего

генератором, размещенным в камере, вводилось фиксированное количество льдообразующего аэрозоля. Использовались следующие генераторы: пиропатрон с льдообразующим составом на основе соединений серебра (состав патента РФ № 2551343, активное вещество  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ , 15% от веса состава, рисунок 2.А), жидкостной наземный генератор (модель, воспроизводящая характеристики французского генератора, активное вещество  $\text{AgI}$  в концентрации 2%, рисунок 2.Б), генератор, осуществляющий термическую возгонку растворов органических льдообразующих веществ (активное вещество флороглуцин, термическая возгонка водно-спиртового раствора).

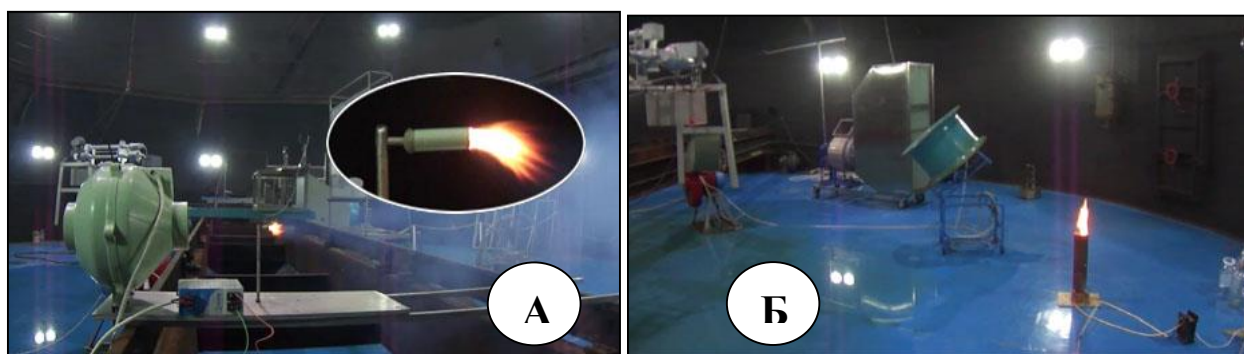


Рис. 2. Эксперимент в БАК. А – сжигание пиропатрона 2,5 г состава по патенту РФ № 2551343, скорость обдува 10 м/с, Б – работа наземного аэрозольного генератора.

После окончания работы генератора среда в БАК перемешивалась, камера герметично закрывалась на 3 суток с периодическим исследованием спектра аэрозоля и его льдообразующей активности. Для измерений использовалась следующая аппаратура: измерение спектра аэрозоля – «Electrostatic Classifier TSI 3080» и «Laser Aerosol Spectrometer TSI 3340», льдообразующая эффективность – климатическая камера «Feutron 3001-01» с переохлажденным туманом при температуре минус  $10^{\circ}\text{C}$ .

### Экспериментальные результаты

В результате всех проведенных экспериментов обнаружено снижение льдообразующей активности аэрозоля с течением времени. Данный факт сам по себе мало информативен, поскольку со временем одновременно меняются и физические характеристики аэрозоля, прежде всего концентрация, однако, если сопоставить изменение льдообразующей активности с изменением концентрации, следует отметить достаточно существенные различия для всех исследованных случаев, представленные на рисунке 3. Так, если льдообразующая активность аэрозоля пиротехнического генератора убывает практически пропорционально убыли его концентрации, то льдообразующая активность аэрозолей флороглуцина и йодистого серебра, об-

разованного при работе жидкостных генераторов, претерпевает резкое первоначальное изменение, причем со временем активность аэрозоля флороглюцина превосходит активность аэрозоля йодистого серебра.

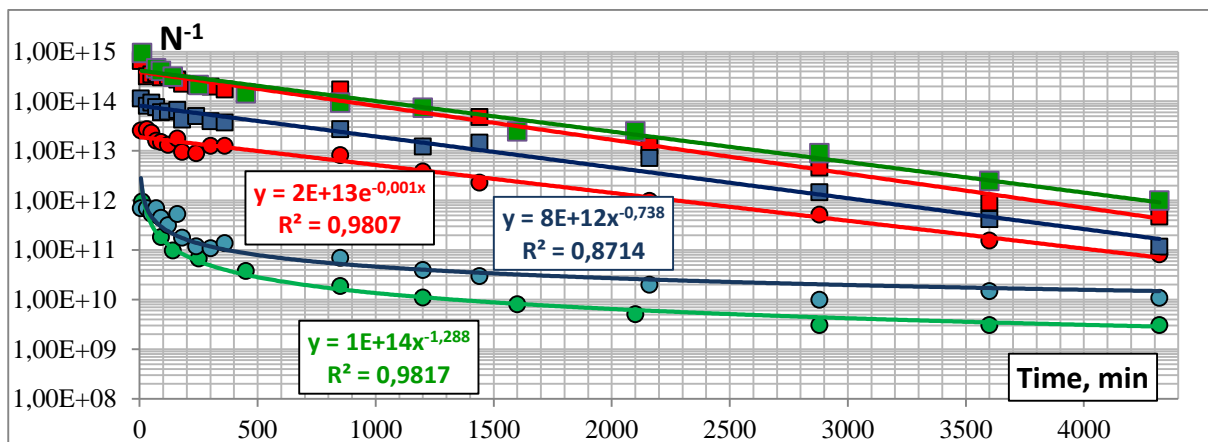


Рис. 3. Изменение льдообразующей активности и концентрации аэрозоля, образованного различными генераторами. На графике приведена информация для: пиротехнического генератора (■ – концентрация аэрозоля, ● – его льдообразующая активность), жидкостного ацетонового генератора (■ – концентрация аэрозоля, ● – его льдообразующая активность), аэрозоля флороглюцина (■ – концентрация, ● – льдообразующая активность). Льдообразующая активность измерялась при минус 10°С и выражена количеством активных частиц на грамм состава (раствора), концентрация аэрозоля представлена общим количеством частиц в БАК. Данные измерения проводились при относительной влажности в диапазоне 90-95%.

Более информативна информация об изменении со временем доли частиц аэрозоля, проявляющих льдообразующую активность, представленная на рисунке 4.

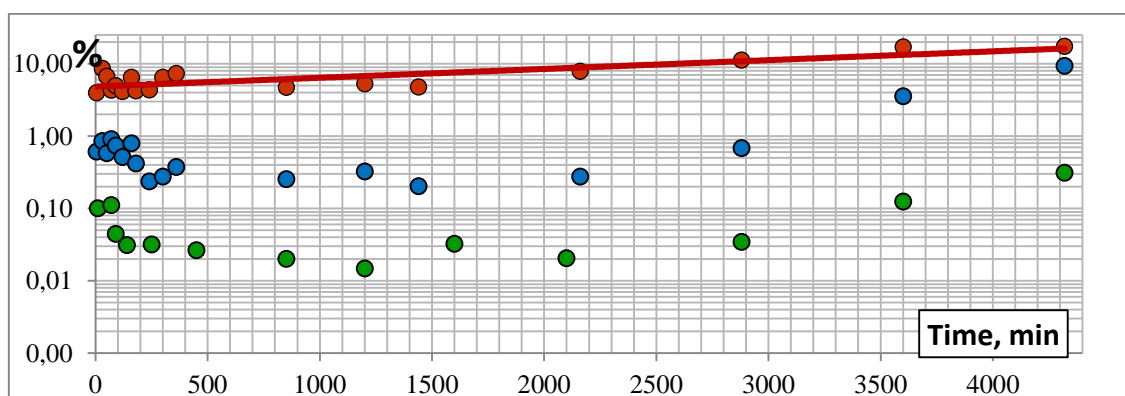


Рис. 4. Изменение доли активных частиц со временем при температуре минус 10°С и относительной влажности 90% для аэрозолей: ● – йодистое серебро (пиротехнический состав), ● – йодистое серебро (жидкостной генератор), ● – флороглюцин (жидкостной генератор).

Прежде всего, следует отметить высокая, достигающая 10%, доля активных частиц аэрозоля пиротехнического состава, в то время как для аэрозоля йодистого серебра жидкостного генератора он не превышает одного процента на всем диапазоне измерений. Видимо, это связано с высоким содержанием соединений серебра в составе аэрозольных частиц в первом случае и с гораздо большими размерами частиц аэрозоля. В случаях аэрозолей, образованных жидкостными генераторами, первоначально процент активных частиц небольшой, но увеличивается по мере нахождения аэрозоля в БАК. Такое увеличение имеет место для всех исследованных случаев и отчасти скорее всего связано с процессами коагуляции аэрозоля – одновременно с уменьшением концентрации увеличивается размер частиц, а соответственно и их льдообразующая активность.

Следует отметить достаточно аномальное поведение аэрозоля флороглуцина. В то время как первоначальная его активность несколько меньше активности аэрозоля йодистого серебра ацетонового генератора ( $7,02E+11$  против  $9,56E+11$ ), со временем активность превосходит активность аэрозоля йодистого серебра как по абсолютному количеству активных частиц ( $1,1E+10$  против  $3,1E+9$ ), так и по их процентному содержанию (9,35% против 0,31%) и достаточно близко подходит к проценту активных частиц аэрозоля пиросостава (17%).

Зависимости изменения процентного содержания частиц аэрозоля, проявляющих льдообразующую активность от влажности, представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Доля активных частиц аэрозолей исследованных веществ после выдержки в БАК в течение 3-х суток при фиксированном диапазоне относительной влажности**

Характеристика аэрозоля	Влажность 35-40%	Влажность 60 – 65%	Влажность 90 – 95%
Аэрозоль пиротехнического состава (15% $Ag_3Cu_4$ ), в момент генерирования активно 4% частиц	21,3%	18,6%	17,0%
Аэрозоль наземного ацетонового генератора (2% $AgI$ ), в момент генерирования активно 0,1% частиц	7,14%	2,5%	0,31%
Аэрозоль жидкостного генератора (спиртовой раствор флороглуцина), в момент генерирования активно 0,61% частиц	9,9%	10,6%	9,35%

Следует отметить, что наибольшая зависимость льдообразующей активности от влажности имеет место для аэрозоля йодистого серебра образованного жидкостным генератором – при изменении влажности от 35 до 90% доля активных частиц после длительной выдержки (3-е суток) аэрозоля в среде уменьшается в 23 раза, в то время как активность аэрозолей йодистого серебра пиросостава и аэрозоля флороглуцина жидкостного генератора изменяется незначительно, что находится в соответствии с ранее полученными нами данными [3, 4].

## **Заключение**

1. Следует отметить очень низкую эффективность жидкостных наземных генераторов, особенно при использовании рабочих растворов, содержащих малое количество йодистого серебра. Если первоначальная активность аэрозоля такого генератора составляет  $2E+11$  активных при минус  $10^{\circ}C$  частиц на грамм состава (что является достаточно хорошим результатом для генераторов такого типа), при выдержке в среде с высокой влажностью в течение нескольких часов его активность падает на порядок величины. При этом эффективность использования йодистого серебра составляет  $4E+12$  активных частиц на грамм  $AgI$ .
2. Более целесообразно применять наземные генераторы пиротехнического типа с высоким содержанием соединений серебра в пиросоставе. Так, аэрозоль состава по патенту РФ № 2551343 ( $15\% Ag_3CuI_4$ ) при первоначальной активности  $2,65E+13$  (в момент генерирования) через три часа при нахождении в среде с высокой влажностью снижает активность всего до  $1,79E+13$ , т.е. в 1,5 раза. При этом эффективность использования серебра в расчете на йодистое серебро составляет  $1,43E+14$ , таким образом серебро в случае пиросостава используется в 36 раз более эффективно. Скорее всего, это связано с большим размером частиц, образованных при горении пиросостава благодаря активному шлакообразованию, что не имеет место при работе ацетонового генератора.
3. Полученные для флороглюцина данные заслуживают дальнейшего рассмотрения. Хотя активность аэрозоля флороглюцина невысока (в момент генерирования составляет  $7E+11$ ) скорость уменьшения активности при выдержке в целевой среде в течение нескольких часов снижается незначительно (до  $5,4E+11$  за три часа). А при нахождении в целевой среде в течение трех суток активность аэрозоля в по абсолютной величине приближается к активности аэрозоля 15%-ного пиросостава ( $8,3E+10$  – для пиросостава и  $1,1E+10$  – для аэрозоля флороглюцина).

## ***Список литературы***

1. National Center for Environmental Information [www.ncdc.noaa.gov/stormevents/](http://www.ncdc.noaa.gov/stormevents/)
2. List of costly or deadly hailstorms. [www.en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_costly\\_or\\_deadly\\_hailstorms](http://www.en.wikipedia.org/wiki/List_of_costly_or_deadly_hailstorms)
3. Shilin A.G., Drofa A.S., Ivanov V.N., Savchenko A.V., Shilin V.A. Experimental Studies of Silver Iodide Pyrotechnic Aerosol Ice Forming Efficiency Dynamics. – AIP Conf. Proceedings, Vol. 1527 — 19<sup>th</sup> International Conference «Nucleation and Atmospheric Aerosols» – New York, 2013. – P. 945-949 (En).

4. Шилин А.Г., Федоренко А.И., Иванов В.Н., Савченко А.В.. Исследование процессов старения льдообразующих аэрозолей, содержащих йодистое серебро и органические льдообразующие соединения. Сборник статей «Вопросы физики облаков. Атмосферные аэрозоли, активные воздействия». – Москва, 2015 – С. 342 - 347.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ИЗ НАНОТРУБОК УГЛЕРОДА НА ЛЬДООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТАВА АД-1**

**Хучунаев Б.М., Теунова Н.В., Хучунаев А.Б., Будаев А.Х.**  
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Эффективность реагентов для воздействия на облачные процессы определяются удельным выходом льдообразующих ядер с единицы массы реагента, что равно отношению количества льдообразующих ядер к общему количеству частиц, выраженное в процентах. Эффективность используемых на практике активных воздействий реагентов составляет не более 10%. Одним из способов повышения льдообразующей эффективности реагентов это создание льдообразующих частиц с пустотами внутри, к таким частицам относятся нанотрубки, таким образом, задача сводится к получению реагента в виде нанотрубок. В работах [1,2] нами описывается методика и аппаратура синтеза нанотрубок AgI. В данной статье мы приводим результаты исследования льдообразующих свойств пиротехнического состава Ад 1 с углеродными добавками. В качестве углеродных добавок использовался аморфный графит и углеродные нанотрубки. Была проведена серия экспериментов по определению удельного выхода льдообразующих частиц состава АД1. Эксперименты проводились по стандартной методике в малой облачной камере ВГИ. Возгонка реагента производилась на графитовой подложке. В качестве реагента использовался АД1и АД1 с углеродной добавкой. Доля углеродной добавки составляла 9% от общей массы. Ток, подаваемый, на подложку составлял 80-100А. Результаты экспериментов по определению льдообразующих свойств АД1 и АД1 с углеродной добавкой приводятся в таблицах 1 и 2.



Таблица 1

**Результаты испытания льдообразующей составляющей АД-1**

Осредненная температура $t, ^\circ\text{C}$	Удельный выход, $\text{г}^{-1}$	Осредненная температура $t, ^\circ\text{C}$	Удельный выход, $\text{г}^{-1}$	Осредненная температура $t, ^\circ\text{C}$	Удельный выход, $\text{г}^{-1}$
-9,6	$2,7 \times 10^{12}$	-10,1	$8,8 \times 10^{11}$	-9,1	$6,2 \times 10^{12}$
-5,9	$1,06 \times 10^{12}$	-9,6	$5,0 \times 10^{12}$	-7,7	$1,2 \times 10^{11}$
-8,2	$3,3 \times 10^{12}$	-13,4	$4,4 \times 10^{12}$	-12,3	$6,5 \times 10^{11}$
-10,4	$1,2 \times 10^{12}$	-9,8	$2,3 \times 10^{12}$	-9,4	$1,6 \times 10^{12}$
-6,8	$6,5 \times 10^{11}$	-10,2	$1,2 \times 10^{12}$	-9,3	$2,9 \times 10^{11}$
-8,7	$1,3 \times 10^{12}$	-9,9	$6,4 \times 10^{11}$	-9,6	$1,2 \times 10^{12}$
-11,9	$5,7 \times 10^{12}$				

В лабораторных условиях была также проведена серия экспериментов по определению льдообразующей активности (удельный выход кристаллов) реагента АД-1 с углеродной добавкой, результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Результаты испытания льдообразующей составляющей АД-1 с углеродной добавкой**

пп	Средняя температура $^\circ\text{C}$	Удельный выход, $\text{г}^{-1} \times 10^{13}$
Реагент АД-1 с углеродной добавкой		
1	-12,7	14
2	-12,9	12
3	-13,2	5
4	-13,3	2,6
5	-12,6	1,4
6	-11,0	1,15
7	-11,6	0,6
8	-11,2	2,3
9	-11,8	0,86
10	-12,2	0,61
11	-11,2	0,1
12	-12,5	3,6
13	-12,7	3,9
14	-12,0	1,3
15	-8,9	2,3
16	-9,1	1,1
17	-12,5	0,5
18	-13,2	5,1
19	-14,4	2,6
20	-13,3	2,5
21	-12,8	1,4
22	-13,6	3,0
23	-13,2	2,9

На рис. 1 представлена фотография частиц АД-1 с углеродной добавкой под оптическим микроскопом.

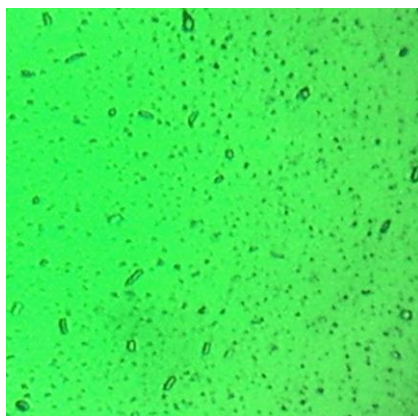


Рис. 1. Фотография частиц АД-1 с углеродной добавкой под оптическим микроскопом.

На рис. 2 показан совмещенный график удельного выхода льдообразующих частиц реагента АД-1 и АД-1 с углеродной добавкой. Ось Y представлена в виде логарифмической шкалы.

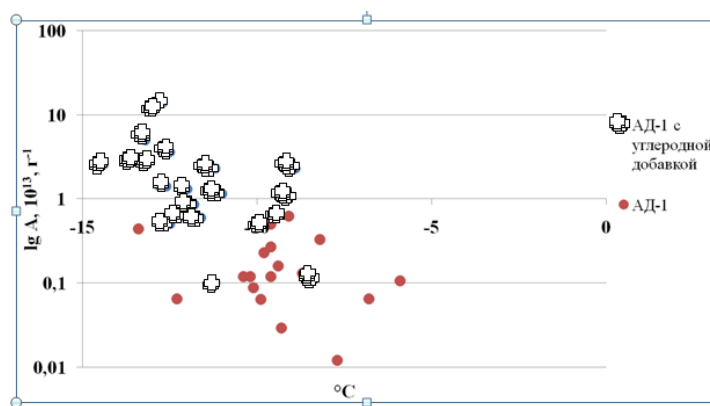


Рис. 2. Удельный выход льдообразующих частиц реагента АД-1 и АД-1 с углеродной добавкой.

Таблица 3

**Результаты исследования выхода льдообразующих частиц реагентов, используемых различными странами при проведении противоголодных работ**

Россия, Чистый АД-1		Россия, ВГИ АД-1 с углеродной добавкой		США, пиростав		Болгария, ШАД	
Тем-ра, °С	N, x10 <sup>13</sup> ,г <sup>-1</sup>	Тем-ра, °С	N, x10 <sup>13</sup> ,г <sup>-1</sup>	Тем-ра, °С	N, x10 <sup>13</sup> ,г <sup>-1</sup>	Тем-ра, °С	N, x10 <sup>13</sup> ,г <sup>-1</sup>
-9,6	0,27	-12,7	14	-3,8	0,004	-10	6,09
-5,9	0,106	-12,9	12	-4	0,01	-10	5,81
-8,2	0,33	-13,2	5	-4,2	0,018	-10	8,17
-10,4	0,12	-13,3	2,6	-4,3	0,0232	-10	4,65
-6,8	0,065	-12,6	1,4	-6,1	0,649	-10,5	10,3
-8,7	0,13	-11,0	1,15	-6,3	0,587	-10,5	10,8
-11,9	0,57	-11,6	0,6	-6,4	0,672	-11	14,5
-10,1	0,088	-11,2	2,3	-10,5	3,03	-11	8,27
-9,6	0,5	-11,8	0,86	-10,5	2,87		
-13,4	0,44	-12,2	0,61	-4,2	0,0153		

-9,8	0,23	-11,2	0,1	-6	0,801		
-10,2	0,12	-12,5	3,6	-10,5	2,91		
-9,9	0,064	-12,7	3,9				
-9,1	0,62	-12,0	1,3				
-7,7	0,012	-8,9	2,3				
-12,3	0,065	-9,1	1,1				
-9,4	0,16	-12,5	0,5				
-9,3	0,029	-13,2	5,1				
-9,6	0,12	-14,4	2,6				
		-13,3	2,5				
		-12,8	1,4				
		-13,6	3				
		-13,2	2,9				
		-5,0	20				
.		-7,7	28				

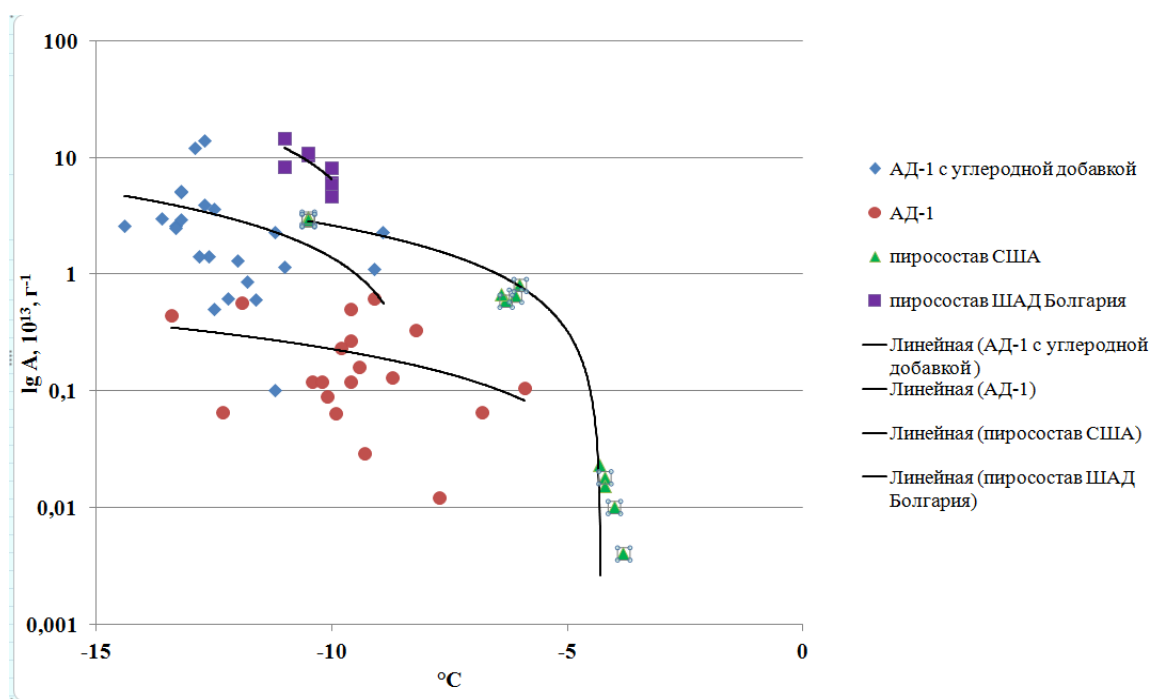


Рис. 3. Результаты исследования выхода льдообразующих частиц реагентов, используемых различными странами при проведении противогололедных работ.

Результаты проведенных исследований показали, что добавление углерода в виде графита к пиротехническому составу увеличивает удельный выход льдообразующих ядер почти на порядок при температурах минус десять градусов и ниже. Сравнение результатов полученных нами с результатами составов США и Болгарии показывают, что удельный выход льдообразующих ядер у них выше, чем у состава АД-1 с углеродной добавкой.

Следующая серия экспериментов проводилась с составами АД-1+3%,6%,9% углеродных нанотрубок. Результаты этих экспериментов приводятся в таблице 4.

**Результаты исследования выхода льдообразующих частиц с составами АД-1+3%,6%,9% углеродных нанотрубок**

АД-1+3% нанотрубки углерода			АД-1+6% нанотрубки углерода			9% АД-1+ нанотрубки углерода		
N	t <sup>0</sup> C	Удел.выход	N	t <sup>0</sup> C	Удел.выход	N	t <sup>0</sup> C	Удел.выход
1	-14	2,4	1	-4,5	0,023	1	-10,6	0,81
2	-11	49	2	-8	0,125	2	-9,3	1,9
3	-12	6,7	3	-5,5	0,05	3	-11,2	4,2
4	-13	34	4	-6,5	0,18	4	-12,9	4,9
5	-13	24	5	-9	0,79	5	-12,1	3,3
6	-11,6	1,17	6	-8	0,123	6	-12,8	2,8
7	-9	0,67	7	-7,5	0,4			
8	-9	0,67	8	-8,6	0,83			
9	-6	0,69	9	-9,5	0,97			
10	-6,8	0,63	10	-9	0,66			
11	-7	0,62	11	-7,4	0,038			
12	-6,8	0,2	12	-9	0,28			
13	-8,2	0,48	13	-10	0,1			
14	-5,5	0,8	14	-9,6	0,88			
			15	-9,2	1,6			
			16	-13,3	1,08			
			17	-11,5	2,08			
			18	-10	1,9			
			19	-10,4	1,3			
			20	-10,5	1,4			
			21	-12,3	1,2			
			22	-12	2,7			
			23	-12	2,6			
			24	-9,4	3,43			
			25	-9,4	8,93			

Как видно из таблицы добавление нанотрубок к составу АД-1 не приводит к увеличению удельного выхода льдообразующих ядер.

По-видимому, это связано с тем, что при возгонке такого состава на частицах реагента, как видно и фотографии (рис. 4) образуется водяная пленка, и образование кристаллов на таких частицах происходит иначе.

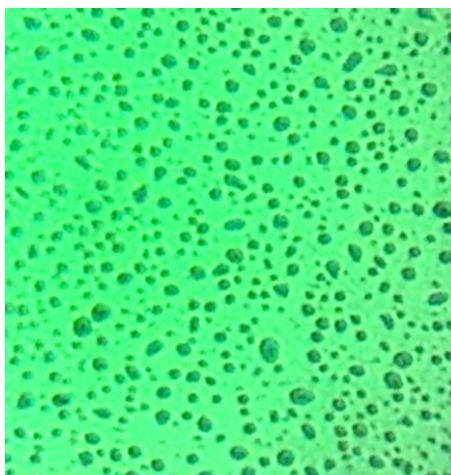


Рис. 4. Фотографии частиц АД-1+нанотрубки углерода под оптическим микроскопом  
В перспективе планируется исследовать конденсационные свойства этих составов.

На рисунке 4 показаны капли образованные на частицах при термической возгонке состава АД-1 +нанотрубки при влажностях 40-60% , размерами капель до 7-10мкм.

#### **Заключение**

В результате проведенных исследований получено, что:

- удельный выход льдообразующих ядер с пиротехнического состава АД-1 с углеродной добавкой в виде графита по сравнению с состава АД-1 почти на порядок выше;
- углеродные добавки в пиротехнический состав АД-1 в виде нанотрубок углерода не влияет на льдообразующую активность;
- на частицах полученных термической возгонкой из состава АД-1 +нанотрубки при влажностях 40-60% образуются капли размерами до 7-10мкм.

#### **Список литературы**

1. Тапасханов В.О., Хучунаев Б.М., Хучунаев А.Б., Панаэтов В.П. /Предварительные результаты исследования льдообразующих свойств Оксида цинка и AgI//Доклады всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 7-9 октября 2014г., ч.2, с.190-194.
2. Тапасханов В.О., Хучунаев Б.М., Глисов М.И., Хучунаев А.Б., Куповых Г.В. Предварительные результаты исследования конденсационных льдообразующих свойств нанотрубок AgI и оксида цинка // Известия ВУЗов Северо-Кавказский регион, № 6, 2014, с. 40-43.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК РЕАГЕНТОВ ДЛЯ РАБОТ ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Данелян Б.Г., Сосникова Е.В.

ФГБУ «ЦАО», г. Долгопрудный

В практике активных воздействий используются два класса реагентов - льдообразующие вещества и гигроскопические соединения. Эффективность первых связана со специфическими физико-химическими свойствами, обуславливающими их способность служить зародышами для образования ледяных кристаллов.

После введения в облако гигроскопических частиц, они, за счет имеющихся в облаке пересыщений водяного пара, имеют преимущественный конденсационный рост водяных капель, сформированных на частицах реагента. И при достаточном количестве соли, такие капли за счет конденсации могут вырасти до размера, при котором начинается реализовываться коагуляционный механизм роста.

Разработка пиротехнического способа получения искусственных льдообразующих аэрозолей явилась огромным достижением в развитии средств активных воздействий и легла в основу разработки большинства современных методов воздействия на облака.

В СССР раньше, чем в других странах, были поняты преимущества пиротехнического способа, и разработка пиротехнических средств была начата уже с середины 50-х годов. В США аналогичные работы начались только в 70-е годы. На начальном этапе решались задачи создания пиротехнических смесей, обеспечивающих при их горении эффективный перевод активных реагентов ( $\text{AgI}$  и  $\text{PbI}_2$ ) в аэрозольное состояние. Первые отечественные пиросоставы И-16 и И-1, содержавшие соответственно 40 и 50%  $\text{AgI}$ , не имели конкурентов. Они не были оптимизированы в отношении полноты использования йодистого серебра, однако в них был угадан наиболее удачный окислитель – перхлорат аммония.

Новая задача, поставленная в связи с необходимостью экономии дефицитного в стране серебра и исключения вредных экологических последствий активных воздействий при применении составов с йодистым свинцом, была решена в конце 70-х годов созданием пиросоставов с 2% содержанием йодистого серебра. Основной состав (50-04-11), использовавшийся не только внутри страны, но и в зарубежных противоградовых проектах, был признан лучшим в мировой практике активных воздействий на начало 80-х годов.

Полное прекращение финансирования в стране работ по совершенствованию составов в начале 90-х годов привело к отставанию от зарубежных разработок. Первые сведения о со-

здании за рубежом более эффективной льдообразующей пиротехники появились на XII Международной конференции по нуклеации и атмосферным аэрозолям в Вене, в 1988г., где группой югославских исследователей были представлены данные о составе с 8% AgI с выходом активных частиц  $2 \cdot 10^{12} \text{ г}^{-1}$  при температуре  $-6^\circ\text{C}$ . Опережение зарубежных разработок стало полностью очевидным с появлением на мировом рынке пиросостава «AU» (10,8% AgI) производства австрийской фирмы S.A.M. Эффективность состава П50-04-11 и лучших зарубежных составов представлены на рисунке 1.

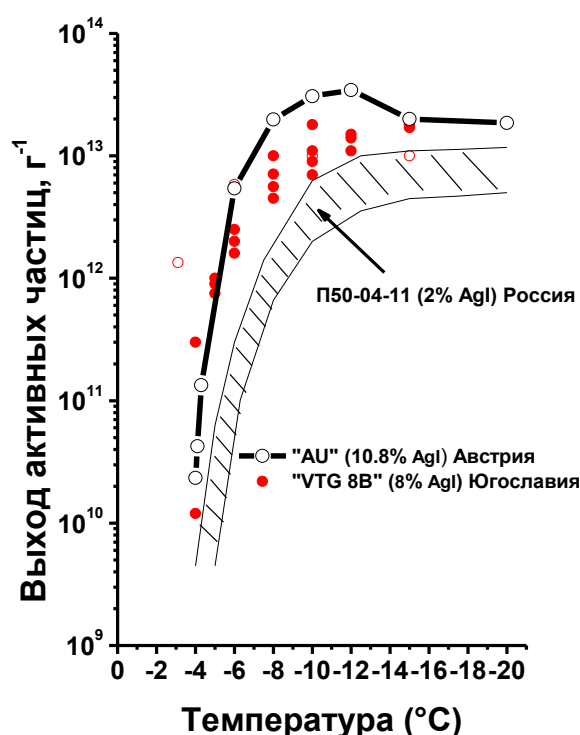


Рис. 1. Температурная зависимость пиросоставов.

По результатам испытаний в ЦАО весьма эффективные пиросоставы были созданы в Болгарии. На рисунке 2 представлены результаты исследований болгарских пиросоставов, испытанных в 2004-2009 годах.

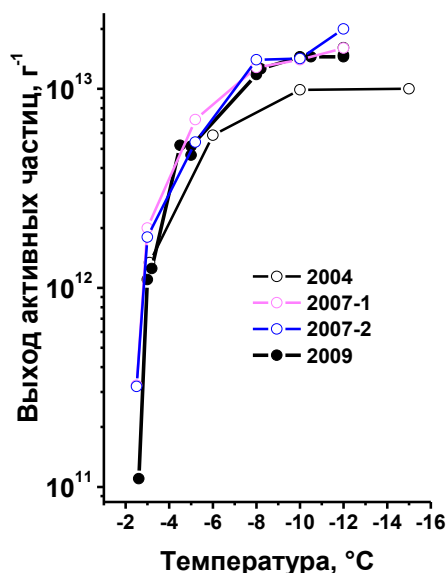


Рис. 2. Эффективность болгарских составов в 2004-2009 гг.

Преодоление отставания потребовало пересмотра оценки экономичности пиротехнического состава по одному критерию – стоимости заложенного в него реагента. Благодаря инициативе НИИПХ и АНО «Агентство АТТЕХ», организовавших кооперацию нескольких научных коллективов – ЦАО и НПО «Тайфун», удалось в короткий срок разработать состав АД-1 с 8% йодистого серебра, близкий по эффективности к составу «АУ», и довести его до промышленного изготовления. Состав входит в отечественные противорадовые и самолетные средства АВ.

На основе пиросостава АД-1 разработан патрон ПВ-26-01 для самолетного засева облаков и противорадовая ракета «Алазань-6». Новый патрон ПВ-26-01 и ракета «Алазань-6» рекомендованы для серийного производства и приняты в эксплуатацию в организациях Росгидромета с 2002 г. В таблице 1 приведены обобщенные данные эффективности состава АД-1 в течение последних лет.

Таблица 1

**Результаты выхода активных частиц (ледяных кристаллов)  
для штатного состава АД-1**

T, °C	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
-(11,0-12,0)	$1,28 \cdot 10^{13}$	$1,24 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$1,36 \cdot 10^{13}$	$1,28 \cdot 10^{13}$	$8,0 \cdot 10^{12}$	$1,71 \cdot 10^{13}$	$1,16 \cdot 10^{13}$
-(10,0-10,5)	$1,19 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$1,23 \cdot 10^{13}$	$7,56 \cdot 10^{12}$	$1,69 \cdot 10^{13}$	$1,06 \cdot 10^{13}$
-(5,5-6,0)	$2,15 \cdot 10^{12}$	$3,26 \cdot 10^{12}$	$3,2 \cdot 10^{12}$	$2,71 \cdot 10^{12}$	$2,84 \cdot 10^{12}$	$2,89 \cdot 10^{12}$	$3,73 \cdot 10^{12}$	$2,26 \cdot 10^{12}$
-(3,0-3,5)	$5,5 \cdot 10^{10}$	$5,7 \cdot 10^{10}$	$8,79 \cdot 10^{10}$	$7,1 \cdot 10^{10}$	$1,50 \cdot 10^{11}$	$3,06 \cdot 10^{10}$	$5,53 \cdot 10^{10}$	$2,65 \cdot 10^{10}$



Однако отсутствие систематических работ по повышению эффективности отечественных составов привело к новым отставаниям. За рубежом, в частности в Болгарии, все время шла интенсивная разработка пиротехнических средств с йодистым серебром. Выход активных частиц от этих составов достигает  $10^{12}$  при температуре облака  $-3^{\circ}\text{C}$ , что превышает выход от состава АД-1 примерно в 15 раз.

Пути совершенствования отечественных составов очевидны. Многолетний опыт исследования и использования льдообразующих веществ в практике АВ приводит к заключению, что возможности совершенствования этого класса реагентов состоят не в поиске новых льдообразующих соединений, который себя исчерпал, а в усовершенствовании пиротехнических составов на основе  $\text{AgI}$ . Для повышения эффективности составов имеется несколько резервов: 1. Увеличение содержания йодистого серебра. При малом вкладе стоимости реагента в стоимость средства воздействия такое увеличение представляется оправданным. 2. Вторым возможным направлением является использование активирующих добавок [1]. Во всех высокоактивных зарубежных составах используется йодистая медь или соли меди. Зарубежное Ноу-хау состоит в способе введения меди в состав. 3. Остаются неисчерпанными возможности оптимизации содержания и рецептуры йодсодержащих гигроскопических компонент состава. Их выбор влияет на химический состав активных частиц и обеспечивает реализацию наиболее эффективного механизма льдообразования (конденсация – замерзание). 4. Наконец, наиболее неизученная область обсуждаемой проблемы – влияние технологии изготовления и условий хранения пиротехнических составов на льдообразующую эффективность.

В течение последнего года в ЦАО было поставлено на испытания несколько новых отечественных пиротехнических составов. На рисунке 3 представлены температурные зависимости выхода активных частиц для новых пиросоставов от различных разработчиков (НПО «Тайфун», ЧПО им. В.И. Чапаева, НИИПХ).

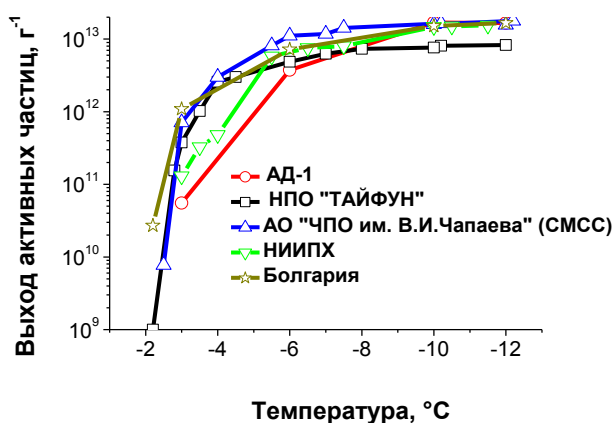


Рис. 3. Эффективность последних отечественных и болгарского составов.

Как видно из рисунка, последние отечественные разработки не уступают по своей активности лучшему болгарскому составу.

Помимо работ по улучшению пиротехнических составов, появились исследования, посвященные созданию «синтетических» льдообразующих реагентов. В одной из зарубежных работ еще в 1960 году прошлого века был предложен оригинальный метод повышения эффективности использования дефицитных льдообразующих реагентов – метод левилитов, заключающийся в получении порошков льдообразующих частиц нанесением тонкого слоя активного вещества на поверхность частиц дешевого инертного носителя [2].

В 80-х годах в Институте химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины в качестве инертного носителя был выбран аморфный непористый высокодисперсный наноразмерный кремнезем (нанокремнезем). 1 г такого нанокремнезема с насыпной плотностью 50-100 г/дм<sup>3</sup> содержит примерно 10<sup>18</sup> первичных частиц диаметром 9–10 нм.

Путем адсорбционного модифицирования с использованием вакуумной техники на поверхность наночастиц наносили неорганические и органические вещества, обладающие льдообразующей активностью. В первую очередь это йодистое серебро, которое до сих пор остается самым эффективным льдообразующим реагентом.

В ЦАО были испытаны несколько кристаллизующих реагентов на основе наноразмерного кремнезема, созданные по принципу левилитов. На рисунке 4 показана эффективность лучших препаратов с нанопокрытием йодистым серебром и пиротехнических составов.

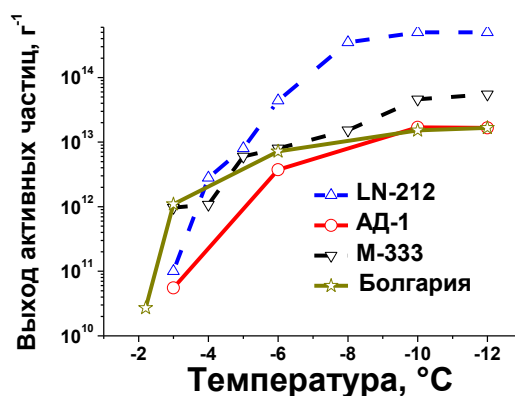


Рис. 4. Сравнительная эффективность препаратов с AgI и пиросоставов.

Новая задача для отечественной пиротехники состоит в разработке пиросоставов гигроскопического действия. В случае гигроскопического аэрозоля дополнительные, непрямые для пи-

ротехники, требования состоят в необходимости получения относительно крупных частиц размером более 0,5 мкм. Вторая задача при разработке гигроскопической пиротехники состоит в обеспечении достаточно высокого выхода аэрозоля заданного химического состава.

В разработке гигроскопических составов основной вопрос состоит в методике оценки их эффективности. В ЦАО была разработана методика испытания таких реагентов, блок-схема испытаний гигроскопических составов представлена на рисунке 5.

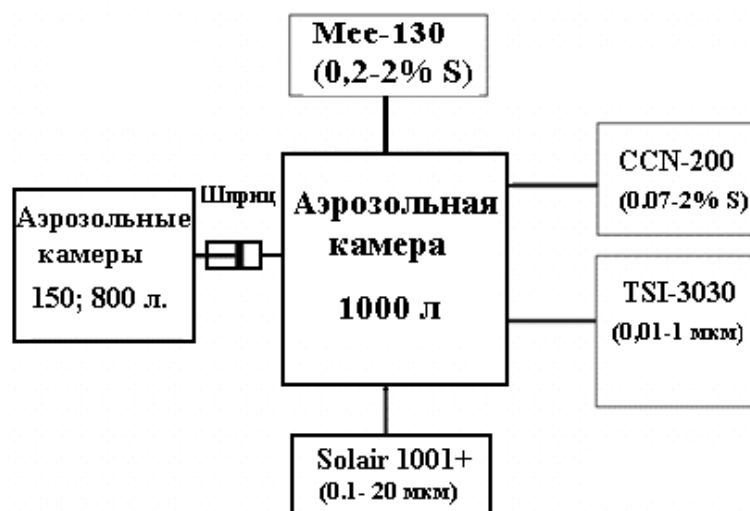


Рис. 5. Блок-схема исследования гигроскопических веществ.

Основным критерием эффективности гигроскопических реагентов является количество облачных ядер конденсации, активирующихся при малых пересыщениях.

Имеющиеся в ЦАО счетчики облачных ядер конденсации МЕЕ-130 и ССН-200 позволяют выделять из общего числа генерируемых частиц гигроскопические ядра и определять их выход. При испытаниях предусматривается:

- определение относительного содержания в генерируемых составах аэрозоля облачных ядер конденсации (ОЯК), активирующихся при пересыщениях водяного пара 0,2–1%;
- определение спектра размеров генерируемых пиросоставами частиц;
- оценка выхода активных облачных ядер конденсации в расчете на 1 грамм состава.

Сжигание образцов производится в аэрозольных камерах объемом 150 или 800 литров, откуда пробы аэрозоля ( $500 - 1000 \text{ см}^3$ ) вводятся в аэрозольную камеру объемом 1000 литров. Из большого аэрозольного резервуара пробы аэрозоля поступают в измерители общей концентрации частиц и счетчики облачных ядер конденсации. Выход определяется как концентрация облачных ядер конденсации в резервуаре объемом  $1 \text{ м}^3$ , деленная на массовую концентрацию аэрозоля в том же резервуаре.

Предварительная проработка возможностей выполнения этих требований дала обнадеживающие результаты. В 2001–2008 гг. под эгидой АНО «Агентство АТТЕХ», «НИИПХ», ЦАО,

НПО «Гайфун» была проведена разработка и испытания более двух десятков гигроскопических составов.

Лучшие испытанные составы обеспечивали генерацию активных облачных ядер конденсации, активация основной части которых происходит при малых пересыщениях водяного пара  $\sim 0,1\%$ , а в спектрах размеров частиц было понижено количество наиболее мелких частиц, уменьшающих, согласно теоретическим оценкам, эффективность гигроскопического действия составов.

### **Выводы**

Сравнение результатов штатного состава АД-1 в течение 8 лет показало удовлетворительное согласие, что позволяет считать заводское изготовление этого состава отработанным.

Опытные пиротехнические составы, созданные в последнее время ведущими разработчиками, не уступают по активности лучшим зарубежным образцам и могут считаться перспективными для дальнейшей отработки и использования в средствах активных воздействий.

В ЦАО разработана методика испытаний гигроскопических реагентов. Методика основана на измерении количества облачных ядер конденсации, активных при пересыщениях  $S \sim 0,1\%$ , (близких к пересыщениям в природных облаках), получаемых от гигроскопических препаратов.

Требуется продолжение разработки гигроскопических пиросоставов и создание отечественного пиротехнического генератора гигроскопического аэрозоля.

### ***Список литературы***

1. Плауде Н.О., Сосникова Е.В. Исследование льдообразующих свойств аэрозолей  $AgI - CuI - NH_4I$ . //Труды ЦАО, 1996, вып.181, с.78–83.
2. Bidault G. Un nouveau proced d insemination des nuages par l iodure d argent. Bul. Obs. Puy-de-Dome, №3, 1960.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЬДООБРАЗУЮЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПОЛНОРАЗМЕРНЫХ ЖИДКОСТНЫХ И ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ  
НАЗЕМНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ  
НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ ФГБУ «ЦАО»**

**Частухин А.В.<sup>1</sup>, Ким Н.С.<sup>1</sup>, Корнеев В.П.<sup>1</sup> Петрунин А.М.<sup>1</sup>,  
Баззаев Т.В.<sup>2</sup>, Данелян Б.Г.<sup>2</sup>, Сосникова Е.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> АНО «Агентство АТТЕХ», г. Москва

<sup>2</sup> ФГБУ «ЦАО», г. Долгопрудный

### **Введение**

С самого начала исследований по активным воздействиям на переохлажденные облачные среды возникла непростая задача оценки льдообразующей эффективности реагентов, которые пригодны для таких воздействий. На первом этапе при разработке экспериментальных методик предполагалось, что основным параметром, определяющим активность аэрозольной частицы, является ее размер. Это предположение основывалось на выводах теории гетерогенной нуклеации льда, разработанной Флетчером в 50-х годах прошлого столетия [8]. В соответствие с этим и разрабатывались экспериментальные методики с применением облачных, термодиффузионных и др. камер, обеспечивающих модельные условия нуклеации льда по разным физическим механизмам, которые предполагала теория Флетчера и ее модификации.

Разработанная в конце 70-х годов численная модель формирования термоконденсационного аэрозоля [2] позволила выявить основные параметры процесса, от которых зависит размер формируемых частиц. И на основе этих выводов была обоснована необходимость применения экспериментальных методик исследования эффективности именно полноразмерных генераторов и в аэродинамических условиях, максимально приближенных к реальным условиям воздействия. Такая методика была разработана и аэродинамический стенд, ее реализующий, подробно описан в [2] и функционирует в НПО «Тайфун». Испытания на этом стенде обеспечивают адекватность дисперсных и структурных характеристик исследуемых аэрозолей характеристикам аэрозолей, формирующихся при функционировании реального генератора в процессе его движения в атмосфере. Однако из-за больших габаритов и ограничений по минимальной скорости воздушного потока в рабочей части аэродинамической трубы данная методика не обеспечивает небольшие скорости разбавления аэрозольной струи, которые имеют место при работе наземных генераторов льдообразующих аэрозолей. Для проведения испытаний полноразмерных наземных генераторов была разработана методика, основанная на при-

менении малого аэродинамического стенда ФГБУ «ЦАО» [1] и проведены исследования льдообразующей эффективности полноразмерных наземных генераторов, результаты которых приводятся в данной работе.

### Методика проведения испытаний

Аэродинамическая труба ФГБУ «ЦАО» является трубой замкнутого типа. Поэтому для проведения испытаний генераторов льдообразующих аэрозолей она была разомкнута таким образом, что вход и выход воздуха в ней осуществляется вне помещения установки. Аэродинамический стенд был дополнен системой отбора проб аэрозоля из тракта трубы, облачной камерой с термостатами для улавливания формирующихся ледяных кристаллов и оптическим микроскопом с цифровой системой регистрации кристаллов. Модернизированный аэродинамический стенд (рис.1) позволяет проводить испытания, как самолетных генераторов льдообразующих аэрозолей, так и наземных генераторов. В первом случае самолетный генератор располагается в рабочей части трубы (рис.1,а), имеющей диаметр круглого поперечного сечения 200 мм. При этом скорость воздушного потока может плавно регулироваться от 0 до 80 м/с. Во втором случае полноразмерный наземный генератор располагается под входным заборным конусом (рис.1,б). При этом меняя объемный расход воздуха в аэродинамической трубе можно моделировать разные скорости разбавления аэрозольной струи из выходной трубы наземного генератора внешним набегающим потоком воздуха.

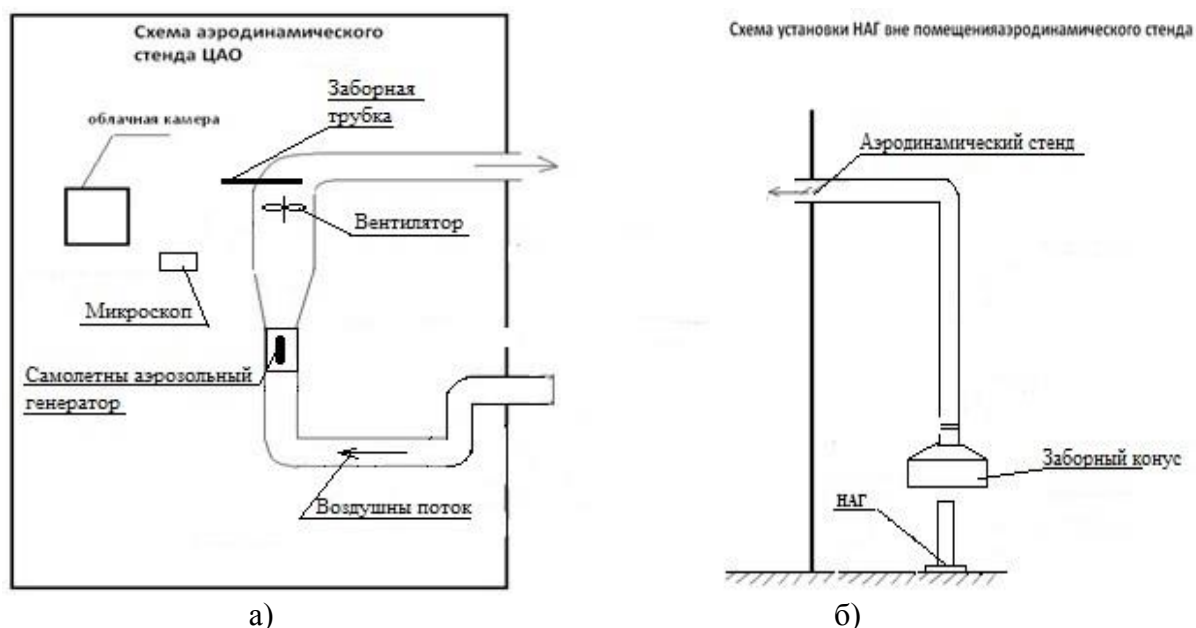


Рис.1. Схема аэродинамического стенда:  
а) испытания генератора при обдуве, б) испытания генератора в наземных условиях

В обоих случаях методика испытания заключается в следующем. В аэродинамической трубе с помощью вентилятора устанавливаются заданные скоростные или расходные характеристики. После включения самолетного или наземного генератора формирующийся льдообразующий аэрозоль поступает в тракт трубы. Затем с помощью пробоотборного устройства через заборную трубку, установленную стационарно в тракте аэродинамической трубы, отбирается дозированная проба аэрозоля, которая вводится в переохлажденный туман, сформированный в облачной камере. Дальнейшая процедура получения данных о льдообразующей эффективности аэрозольного генератора осуществляется по стандартной методике ФГБУ «ЦАО» [4].

### Результаты и обсуждение

Ниже приводятся результаты испытаний на льдообразующую эффективность вновь разрабатываемых наземных ацетонового и пиротехнического аэрозольных генераторов и пиротехнических самолетных генераторов.

Испытания наземных генераторов проводились при моделировании их функционирования при скорости ветра 1,5 м/с. На рис. 2 приведены температурные зависимости выхода льдообразующих частиц формирующихся при работе жидкостного наземного генератора с различными ацетоновыми растворами йодистого серебра (AgI).

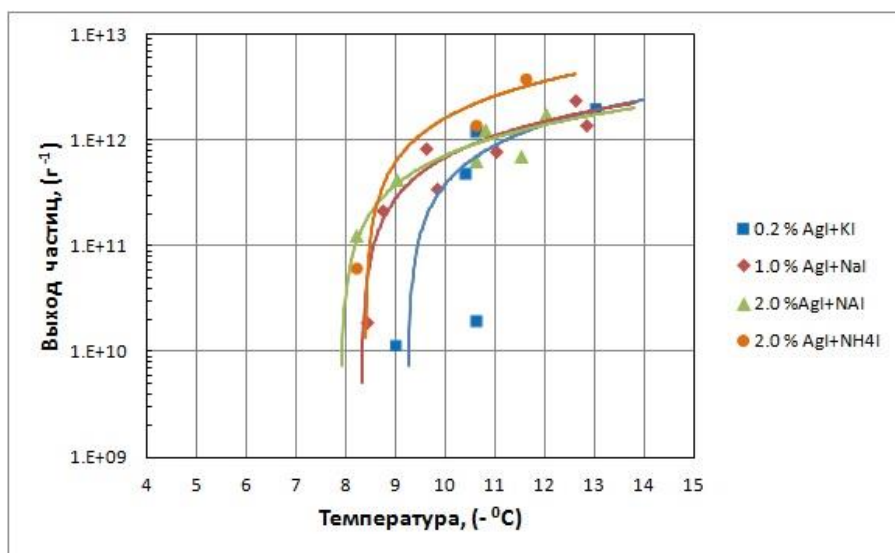


Рис.2. Льдообразующая эффективность жидкостного наземного генератора с различными ацетоновыми растворами AgI.

Как видно из рис. 2 для ацетоновых растворов содержащих 0,2 %, 1 % и 2 % AgI при температурах минус 10 °C - 12 °C льдообразующая эффективность находится на одном уровне.

Пороговая температура срабатывания увеличивается при увеличении содержания AgI в растворах и составляет соответственно для 0,2 % - 9 °С, 1 % - 8,5 °С и 2 % - 8 °С. Следует отметить, эти результаты в области температур минус 10 °С и выше значительно ниже данных, приведенных в других источниках для аналогичных растворов и генераторов [6, 7]. Такие расхождения, по-видимому, связаны с различиями в методиках испытаний.

Для ацетонового раствора, содержащего в качестве йодирующей добавки йодида аммония (NH<sub>4</sub>I), во всем температурном диапазоне льдообразующая эффективность в несколько раз превышает эффективность раствора, содержащего в качестве йодирующей добавки йодид натрия (NaI).

На рис.3 приведены температурные зависимости выхода льдообразующих частиц для одинаковых по химическому составу ацетоновых растворов, но приготовленных по двум разным методикам. В первом случае раствор готовился путем простого растворения компонент при комнатной температуре, во втором – по технологии «ANELFA».

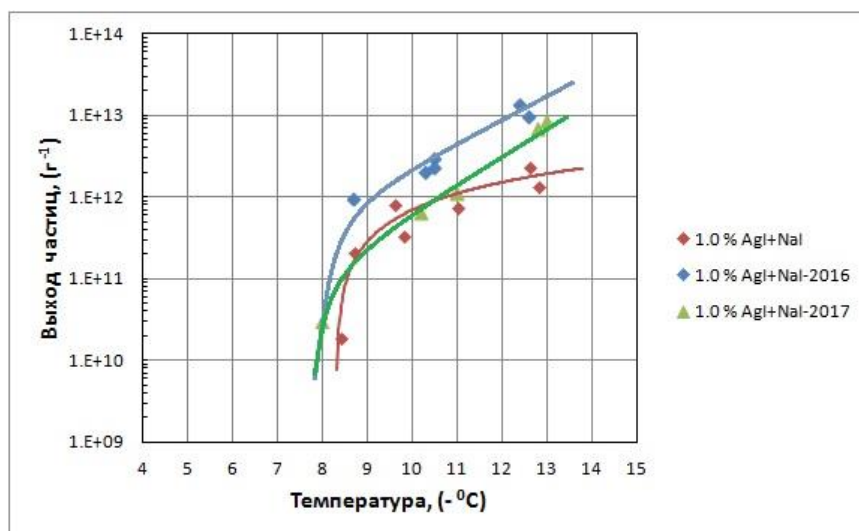


Рис.3. Льдообразующая эффективность ацетоновых растворов:

- ◆ - раствор приготовлены по технологии 1
- ◆ - раствор приготовлены по технологии «ANELFA»,
- ▲ - раствор после длительного хранения.

Как видно из данного рисунка, эффективность ацетонового раствора, приготовленного по технологии «ANELFA» во всем температурном диапазоне превосходит в несколько раз эффективность ацетонового раствора, приготовленного по технологии 1. Причины такого расхождения пока не выяснены, но оно указывает на то, что в технологиях приготовления растворов еще имеются неиспользованные резервы. Существенным фактором, влияющих на эффективность растворов является срок их хранения. Это наглядно видно из сравнения данных рис.3. Так, после хранения раствора в течение 1 года его эффективность в области температур ниже минус 10 °С уменьшилась в несколько раз.



На рис.4 приведены результаты испытаний самолетного генератора САГ-26 при скорости его обдува 60 м/с. Аэрозольный пиротехнический генератор снаряжался как штатным пиротехническим составом АД-1, содержащим 8 % AgI, так и экспериментальным составом СМСС, содержащим 3 % AgI. Этот вариант генератора предусматривал диафрагмирование поверхности горения пиротехнического состава. Здесь же для сравнения кривыми СМСС(КЛС) и АД-1(КЛС). приведены данные, полученные при испытаниях микромоделей образцов составов по стандартной методике ФГБУ «ЦАО» [4].

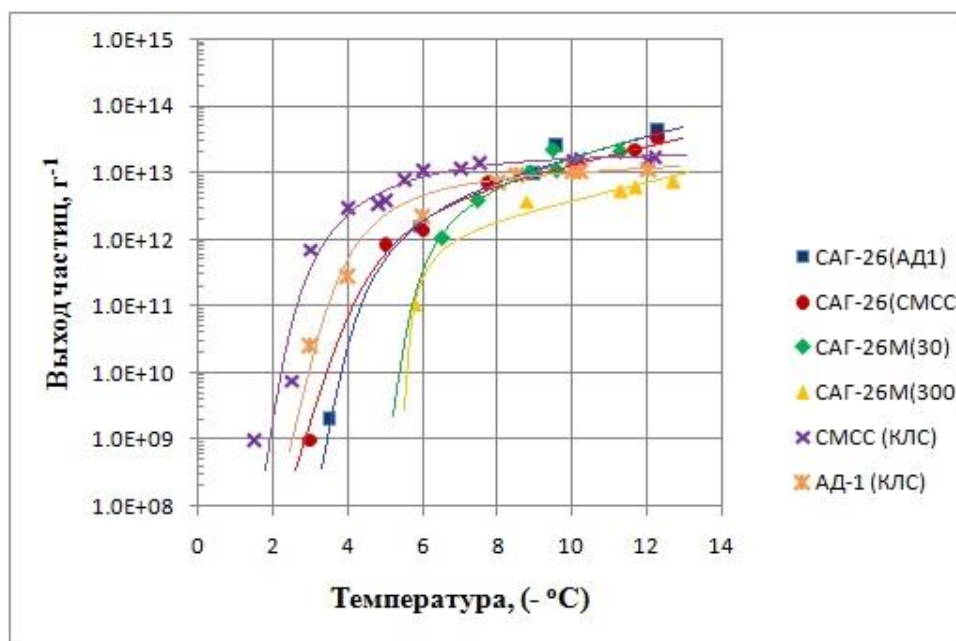


Рис. 4. Эффективность пиротехнических генераторов:  
 САГ-26(АД-1) – состав АД-1, САГ-26(СМСС) – 3 % состав,  
 САГ-26М(30) – отбор пробы на 30 сек., САГ-26М(300) – отбор пробы на 300 сек,  
 СМСС(КЛС) – 3 % состав испытанный по стандартной методике ФГБУ «ЦАО»,  
 АД-1(КЛС) – состав АД-1 испытанный по стандартной методике ФГБУ «ЦАО».

Для оценки влияния параметров горения внутри генератора была проведена серия экспериментов, в которых отбор проб осуществлялся на 30 и 300 секундах после начала горения состава.

Сравнение данных, приведенных на рис.4 показывает, что по своим льдообразующим характеристикам состав СМСС не уступает штатному составу АД-1, а по данным испытаний микромоделей образцов в области температур минус 6<sup>0</sup>С существенно превосходит штатный состав АД-1.

Для полноразмерных генераторов САГ-26М с диафрагмированной поверхностью горения было отмечено, что по мере выгорания пиротехнического состава величина выхода льдообразующих частиц уменьшается (кривые САГ-26М(30) и САГ-26М(300)).

Полученные результаты показывают, во-первых, что объективную информацию о льдообразующей эффективности следует получать при испытаниях полноразмерных генераторов, во-вторых, резервы AgI, как реагента для активных воздействий, еще далеко не исчерпаны. Как показывает практика, оптимизация диспергирования AgI при горении ацетоновых растворов и пиротехнических составов в настоящее время возможна только путем экспериментального подбора режимов горения, конструкций камеры сгорания, химического состава компонент растворов и пиротехники. Такой подбор следует проводить с учетом условий эксплуатации генератора. Например, эффективность пиротехнических составов в микромоделльных генераторах (методика ЦАО) и самолетных генераторах может сильно зависеть от степени диафрагмирования поверхности горения состава. Однако, как показали ранее проведенные теоретические оценки [3], для случая наземных генераторов влияние этого параметра может быть несущественным.

На рис. 5 приведены результаты испытаний разработанного нами [5] наземного пиротехнического генератора, где в качестве пироэлементов применяется аналог САГ-26. В испытаниях использовались пироэлементы как с диафрагмированием поверхности горения, так и с открытой поверхностью горения.

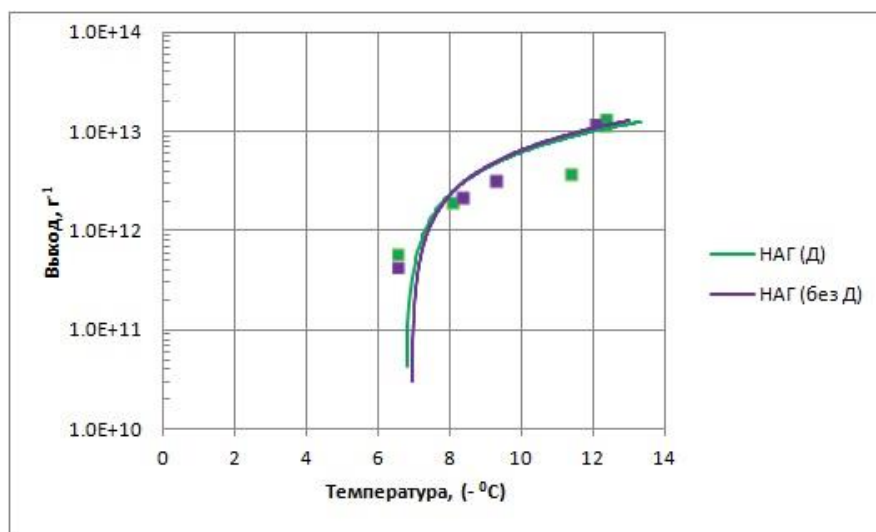


Рис.5. Льдообразующая эффективность пиротехнических генераторов в наземных условиях: НАГ(Д) – с диафрагмированием, НАГ(без Д) – без диафрагмирования.

Как видно из данного рисунка льдообразующая эффективность генераторов, как для случая с диафрагмированием, так и для без диафрагмирования находится на одном уровне. Это указывает на то, что при работе наземных пиротехнических генераторов, когда разбавление начальной концентрации в аэрозольной струе происходит относительно медленно, существенную роль начинает играть броуновская коагуляция льдообразующих частиц, которая

приводит к быстрому уменьшению общей концентрации частиц в струе. Поэтому для наземных генераторов применение диафрагмирования не приводит к увеличению конечного выхода льдообразующих частиц, как для пиротехнических генераторов, используемых в условиях быстрого разбавления (при скоростном обдуве).

## **Выводы**

Таким образом, результаты проведенных стендовых и лабораторных исследований льдообразующей эффективности жидкостных и пиротехнических аэрозольных генераторов показали возможность дальнейшей оптимизации процесса диспергирования AgI путем учета его различных параметров, влияние которых может быть выявлено экспериментальным путем.

## **Список литературы**

1. Живоглотов Д.Н., 2013. Оценка влияния водности на измерения температуры воздуха в облаках по результатам исследований в аэродинамической установке // Метеорология и гидрология. Вып. 8. С. 29 - 39.
2. Ким Н.С., 1980. Исследование влияния условий генерации аэрозоля AgI на его льдообразующую активность // Труды ЦАО. Вып. 142. С. 89-98.
3. Ким Н.С., Корнеев В.П., Петрунин А.М., Частухин А.В., 2015. Методы оценки эффективности современных льдообразующих средств воздействия // Сборник статей памяти Н.О. Плауде. С.168-184.
4. Методические указания: Методика оценки эффективности льдообразующих реагентов и пиротехнических составов в лабораторных условиях. РД.52.11.639-2002. С. 25.
5. Петрунин А.М., Корнеев В.П., Колосков Б.П., Частухин А.В., Бычков А.А., Ким Н.С., Сергеев Б.Н. Исследования распространения льдообразующего реагента в пограничном слое атмосферы при воздействии наземными аэрозольными генераторами «НАГ-07М». // Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета «Наука. Инновации. Технологии». – 2016. – №3. – С. 69-82.
6. Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fleaux Atmospheriques «Anelfa»: <http://www.anelfa.asso.fr/Article-en-attente.html>.
7. Dessens J. Ground experiments in France to prevent hail //J.Weather Modif. – 1979. – Vol. 11 - № 1. – P. 4-17.
8. Fletcher, N.H., 1959. On ice crystal production by aerosol particles // J. Meteorol. V. 16, N 2. P. 173-180.

# ДИНАМИКА И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

Калов Х.М., Калов Р.Х.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

## Введение

Статья посвящена результатам исследований динамики и турбулентности в облачной атмосфере, изложению методики и аппаратного комплекса, разработанных и используемых для измерения скорости воздушных потоков  $V$  и коэффициента турбулентности  $K_T$  в грозовых 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 динамических и турбулентных их характеристик.

Эффективность активных воздействий на градовые облака кристаллизующим реагентом  $AgI$  с целью предотвращения градобитий зависит от многих факторов, в частности, от точности определения места внесения реагента, количества реагента на единицу обрабатываемого объема (дозировки) и времени начала 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 от облаков  $\eta_{10}$ ,  $\eta_{3,2}$ , измеренным с помощью метеоролокатора МРЛ-5 на длинах волн  $\lambda = 10$  см и 3,2 см. 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 величину коэффициента турбулентности в зоне

воздействия (наряду с водностью и концентрацией гидрометеоров) поскольку основным механизмом, разносящим (распределяющим) кристаллизующий реагент в объеме зоны воздействия (наряду с вертикальными потоками) 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» [1-4].

## **2. Методика и аппаратный комплекс для экспериментальных исследований воздушных потоков и коэффициента турбулентности**

### **2.1. Экспериментальный аппаратный комплекс включает в себя [1-3]:**

- 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 ТКБ-06М;
- метеорологическая ракета "Облако-М" со специально разработанной разделяющейся головкой для доставки ПРО в облако;
- ПРО двух видов: «Углен» и «Фольга»;
- средства связи и фоторегистрации.

### **2.2. Методика проведения эксперимента**

Перед началом каждого цикла измерений параметров метеорадиоэха от 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 (блок отображения метеорологической обстановки) 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-М" со специальной разделяющейся головкой;

- непосредственно перед запуском ракеты в азимуте стрельбы производится фоторегистрация вертикального разреза структуры метеорадиоэха от облаков;
- 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 и строится траектория движения отражателей и вычисляются их скорости;
- определяются площади горизонтальных и вертикальных сечений радиоэха от ПРО для последующего вычисления коэффициента турбулентности  $K$ .

### **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-М», 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 из 21 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 градовое облако (над градовым очагом) (рис. 2).
3. 27 июня 1986 г., ракета «Облако» с ПРО «Фольга» запускалась в градовое 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 металлизированных ленточек размерами  $50 \times 2$  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  $219^\circ$ ) 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.

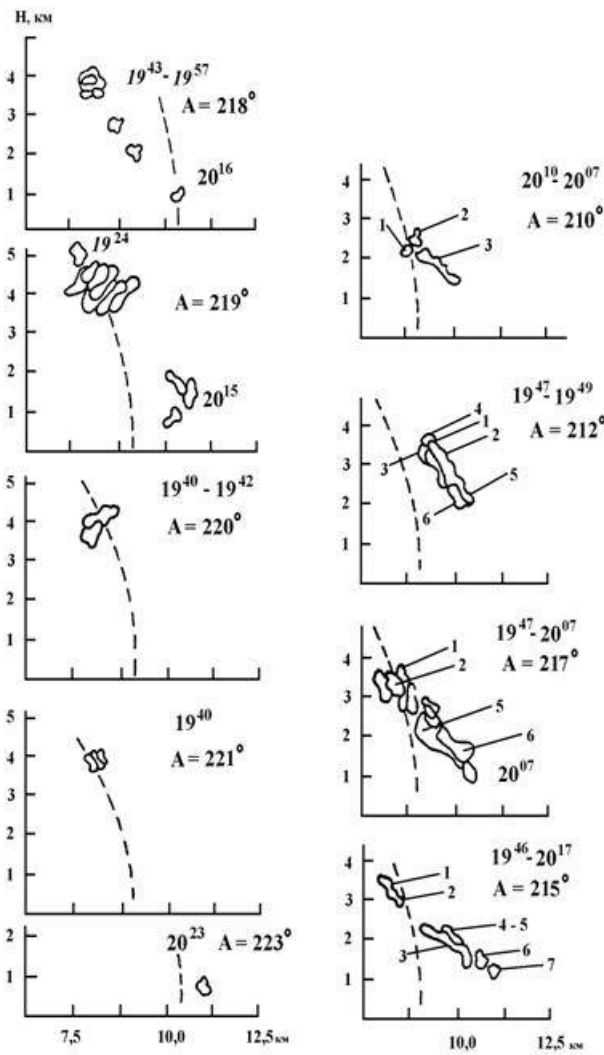


Рис. 1. Оседание ПРО в свободной (безоблачной) атмосфере. 21.07.85г. Радиоэхэ «облака» ПРО в различные моменты времени. А – азимут, цифры (1-7) со стрелками показывают места измерения поляризационных параметров радиоэхэ ПРО.

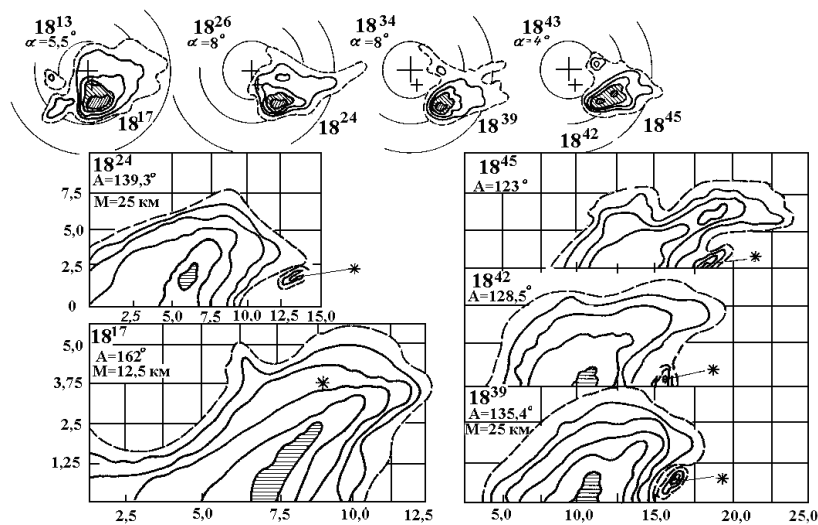


Рис. 2. Запуск ПРО «Углен» в градовое облако (21.06.85г.).  
 Изолинии радиоэхэ градового облака на ИКО (4 верхних рис.) и ИДВ (5 нижних рис.).  
 18<sup>13</sup> – время измерения, А – азимут, М – масштаб, \* - ПРО

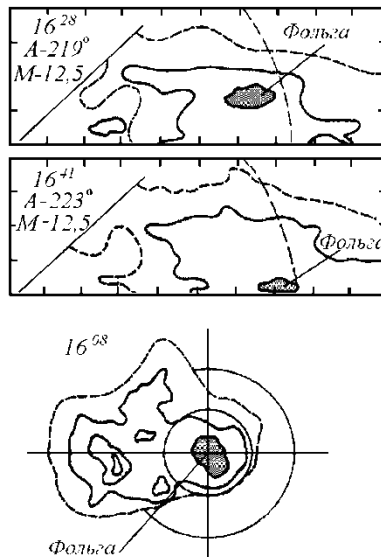


Рис. 3. Выделение радиоэха ПРО «Фольга» на фоне изолиний отражаемости ливневого облака. 27.06.86 г. Траектория перемещения «Фольги» на фоне структуры метеорадиоэха ливневого облака на ИКО и ИДВ. Фото выполнены для круговой поляризации II канала МРЛ-5. А – азимут, М – масштаб,  $16^{28}$  – время.

Из анализа рис. 1 можно сделать вывод, что диполи увлекаются воздушным потоком и перемещаются в пространстве достаточно компактной группой. Это происходит из-за того, что ленты незначительно отличаются 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, присутствующие 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  $219^\circ$ , 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 км. Последнее радиоэхо от облака ПРО было обнаружено в 20 ч 23 мин, т.е. немногим больше 1 ч после запуска ракеты.

Подобные эксперименты были проведены с ПРО типа «Углен». Скорость оседания облака диполей равна  $0,6 \div 0,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . 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. градový процесс проходил над территорией НИП в непосредственной близости от точки наблюдения в радиусе действия ракетной установки. В 18ч 17мин был произведен запуск ракеты с ПРО типа «Углен» (азимут  $162^\circ$ , дальность 8,5 км) на высоту 4,5 км. На рис 2 звездочкой отмечено место внесения ПРО в облако.



«Углен» имел длину 5 см, вес пакета составлял 320 г. В 18 ч 24 мин (азимут  $139,3^\circ$ ,  $H \approx 2,2$  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 ч 25 мин (азимут  $220^\circ$ ) был произведен запуск ракеты «Облако», снаряженной 30 г. «Фольги». В 16 ч 28 мин (азимут  $219^\circ$ ) 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 [5-7]. Над вершиной  $C_v$  облака и вокруг него до расстояний 20-30 км 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, до навеса метеорадиоэха и оседают со скоростью  $1\div 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Скорости нисходящих потоков в диссипирующем облаке доходят до  $20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

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 в 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 значе- ний коэффициента турбулентности к настоящему времени не существует.

Используя в качестве примесей пассивные радиолокационные отражатели (ПРО) нами проводились расчеты коэффициента турбулентности  $K$  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 сопровождается радиолокатором МРЛ-5, определяя 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 коэффициент турбулентности  $K$ .

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 $\text{м}^3$	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 <sup>46</sup>	$2,2 \cdot 10^7$	1200				
14 <sup>50</sup>	$2,8 \cdot 10^7$	800	0,7857	-0,24	2,30	383,3
14 <sup>55</sup>	$5,5 \cdot 10^7$	625	0,4	-0,92	1,98	376,6
15 <sup>01</sup>	$6,4 \cdot 10^7$	425	0,3438	-1,06	1,96	369,8
15 <sup>06</sup>	$6,8 \cdot 10^7$	375	0,3235	-1,13	1,83	80,97

Как видно из таблицы, коэффициент турбулентности во фронтальной части градового облака меняется в пределах  $81\div 383,3 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  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 в их окрестностях с использованием пассивных радиолокационных отражателей (ПРО), вносимых в облако метеорологической ракетой “Облако” с разделяющейся головной частью.

2. Разработана методика определения коэффициента турбулентности 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 коэффициента турбулентности  $K$  зависит от типа градового облака, стадии его развития и места измерения в облаке. В суперячейковых градовых облаках в стадии роста и зрелости  $K=81\div380 \text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ . Во фронтальной части градового облака  $K$  меняется в пределах  $81\div383,3 \text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ , 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 метеорadioэха, 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  $17\div30 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Собственная гравитационная скорость падения ПРО «Углен» составляет  $0,6\div0,7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , «Фольги» -  $0,7\div0,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

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  $4\div6 \text{ км}$ , имеют место восходящие потоки со скоростями  $1\div10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  до температурных уровней  $-1\div-10^\circ\text{C}$  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  $-12\div-18^\circ\text{C}$  по вертикали, наблюдаются нисходящие потоки со скоростями  $1\div10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . В этой части облака величины водности составляют  $q=0,04\div3,54\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$ , концентрация гидрометеоров  $N=150\div5000\text{м}^{-3}$  (при критическом диаметре частиц осадков  $d_{\text{кр}}=1000\text{мкм}$ ), 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  $t = -12 \div -18^\circ\text{C}$  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 роста и формирования условий зарождения и роста града). Время внесения кристаллизующего реагента определяется моментом формирования крупнокапельной ( $d = 10^3 \text{ мкм}$ ) переохлажденной зоны с концентрациями  $N = (1,5 \div 50) \cdot 10^2 \text{ м}^{-3}$  (водности  $q = 0,04 \div 3,5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ ), 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  $1 \text{ км}^3$ ). 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  $1 \text{ км}^3$  обрабатываемой облачной зоны потребуется израсходовать  $95 \div 285$  г реагента.

### **Список литературы**

1. Калов Х.М., Калов Р.Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозо-градовые облака и туманы. – Нальчик: ООО «Полиграфсервис и Т». 2010. - 220 с.
2. Некоторые результаты по оценке физических параметров грозоградовых процессов на основе поляризационных измерений / Пашкевич М.Ю., Богомолов О.С., Калов Х.М., Стрельцов Ю.П. // Труды Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы.- Л.: Гидрометеоиздат, 1990.- С.537-542.
3. Богомолов О.С., Калов Х.М., Пашкевич М.Ю. Исследование распространения ПРО в облаке и околооблачном пространстве. // Труды ВГИ.- 1989.- Вып.76.- С.82-87.
4. 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. // Труды ГГО.- 1982.- Вып.457. - С.78-83.
5. Бибилашвили Н.Ш., Евстратов В.В., Ковальчук А.Н. Некоторые результаты исследования воздушных потоков в окрестности кучево-дождевых облаков. // Труды ВГИ.- 1974.- Вып.28.- С.27-31.

6. 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.
7. 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.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАДИИ РОСТА КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА ПО ДАННЫМ САМОЛЕТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ**

**А.М. Струнин, М.А. Струнин**

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный, МО

### **Введение**

Данные о спектральной структуре и интенсивности турбулентности необходимы для анализа микрофизического строения облаков, полноценного численного моделирования процессов облако- и осадкообразования, активных воздействий. Вместе с тем, сведений в литературе о взаимосвязи между воздушными движениями в облаках и микроструктурой облаков практически нет, что затрудняет как проведение активных воздействий на облака, так и оценку результатов таких воздействий.

### **Самолетный эксперимент по исследованию тропических конвективных облаков**

Настоящая работа основана на данных, полученных во время самолетных исследований конвективных облаков тропической зоны в рамках комплексного российско-кубинского эксперимента в 2007 г. на метеорологическом полигоне вблизи г. Камагуэй [6]. С борта самолета Ан-26 измерялись пульсации горизонтальной  $u'$  и вертикальной компонент скорости ветра  $w'$  и пульсации температуры  $T'$ , погрешности измерения составляли 7 - 8%, а верхний предел частоты измеряемых пульсаций - 13 Гц [6]. Полная  $T_{wс}$  и жидко-капельная  $L_{wс}$  водности облака измерялись прибором ИВО конструкции А.Н. Невзорова [9]. Погрешность измерения составляла около 10%, а частота измерения – до 10 Гц. Всего над метеорологическим полигоном Кубы в период с 17 августа по 4 октября 2007 г. было изучено более 60-ти конвективных

ячеек. Облака, в которые входил самолет-лаборатория на высоте около 5 км, характеризовались как Cu cong относительно небольшой мощности, с максимальной высотой верхней границы 7–8 км. Контроль возникновения, развития и перемещения ячеек проводился с помощью наземного метеорологического радиолокатора [6].

В величины температуры воздуха  $T_a$ , определенные с учетом динамического нагрева, вводились поправки на изменение высоты полета самолета на измерительном режиме [6]:

$$T_h = T_a + \zeta \Delta h_b, \quad (1)$$

где  $\zeta$  - вертикальный градиент температуры воздуха на уровне полета самолета, а  $\Delta h_b$  - изменения барометрической высоты самолета на измерительном режиме. Градиент температуры определялся эмпирически во время зондировки в каждом полете. Для исключения влияния облачных капель на показания датчика температуры был применен метод, позволявший определять истинные значения температуры и ее пульсаций в облаке  $T$  [5]:

$$T = T_h + k_w \Delta T^* Lwc, \quad (2)$$

где  $\Delta T^*$  - динамическая поправка за счет торможения потока в датчике температуры, а экспериментально определенный коэффициент  $k_w = 0,17 \text{ м}^3 \text{ г}^{-1}$  [10]. Было показано, что максимальная погрешность определения величины  $T$  не превышала  $0,35^\circ\text{C}$  [5].

### Расчет спектральных характеристик турбулентности в облаках

Для исследований спектральной структуры пульсаций  $w'$  и  $T'$  было применено вейвлет-преобразование Морле, что позволило определить спектры пульсаций  $E_w$ ,  $E_T$  и коспектры между пульсациями  $C_{wT}$ , а нормированные спектры и коспектры рассчитывались по формулам:

$$\Phi_{w,T}(k) = \frac{kE_{w,T}(k)}{\sigma_{w,T}^2}, \quad \Phi_{wT}(k) = \frac{kC_{wT}(k)}{cov_{wT}}, \quad (3)$$

где  $k$  – волновое число,  $\sigma_{w,T}^2$  - дисперсии пульсаций, а  $cov_{wT}$  - абсолютные значения ковариаций.

### Характеристики турбулентности в конвективных облаках

Было показано, что спектральные характеристики пульсаций зависели от стадии развития облака, для определения которой использовалась степень перегрева облака относительно окружающей его среды [4]. Разность температур между облаком и окружающей средой  $\Delta$  в

диапазоне от 0,25 до 0,90°C ( $\bar{\Delta}=0,53 \pm 0,24^\circ\text{C}$ ) определяла коспектры  $\Phi_{wT}(k)$  для стадии роста, в диапазоне  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  ( $\bar{\Delta}=0,03 \pm 0,09^\circ\text{C}$ ) – для стадии стабилизации, а в диапазоне от -0,20 до -0,60°C ( $\bar{\Delta}=-0,46 \pm 0,11^\circ\text{C}$ ) – коспектры для стадии диссипации облака. Использование этого критерия хорошо согласовывалось с известным способом определения относительного времени жизни облака  $\bar{\tau}$  по данным наземного радиолокатора [3].

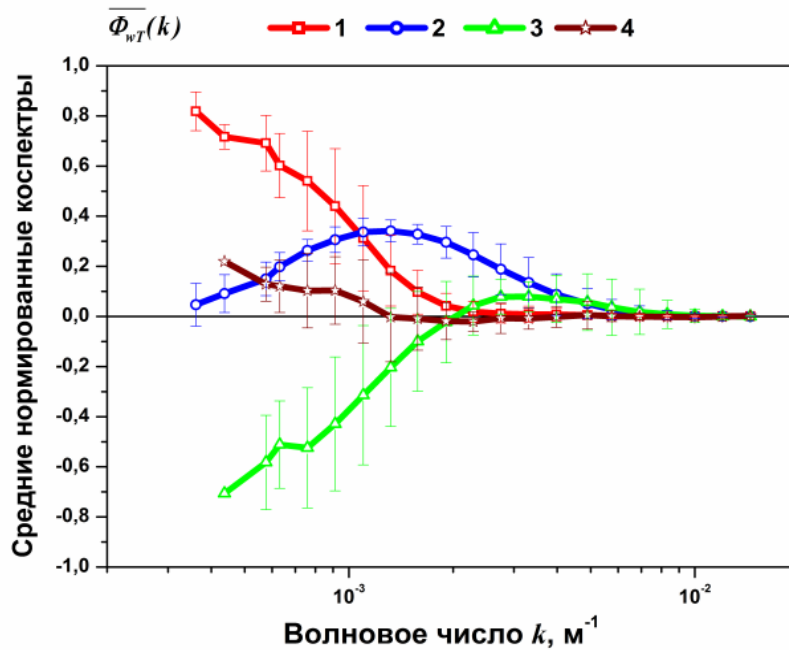


Рис. 1. Средние нормированные коспектры  $\Phi_{wT}(k)$  для различных стадий развития облаков (1 - стадия роста; 2 - стадия стабилизации; 3 - стадия диссипации; 4 – прочие данные, не вошедшие в анализ предыдущих стадий).

На рис.1 представлены средние коспектры, построенные для различных стадий развития облака. Отметим, что различие между коспектрами были значимыми, о чем свидетельствовали отмеченные на рисунке среднеквадратические значения отклонения коспектров. Необходимо также оговориться, что при расчетах характеристик турбулентности были получены спектральные кривые, отличающиеся от коспектров для выделенных стадий и относящиеся к некоторым переходным фазам. Эти коспектры занимали некоторое промежуточное положение между выделенными стадиями.

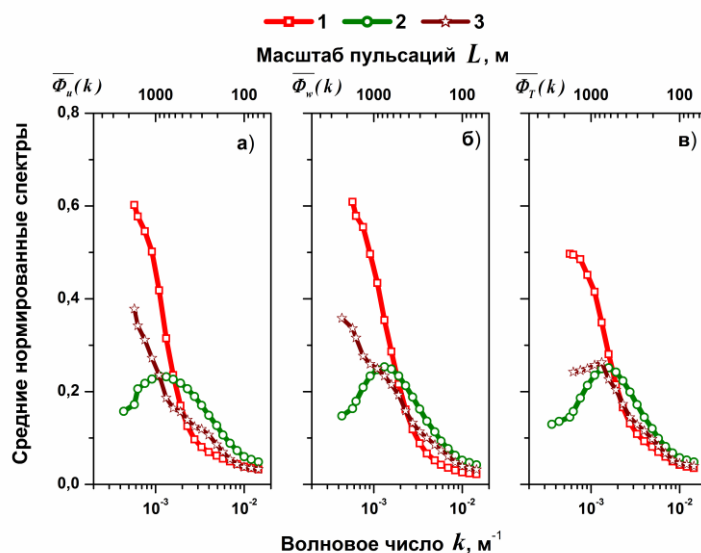


Рис.2. Средние нормированные спектры пульсаций горизонтальной  $\overline{\Phi}_u(k)$  (а), вертикальной  $\overline{\Phi}_v(k)$  (б) компонент скорости ветра и пульсаций температуры воздуха  $\overline{\Phi}_T(k)$  (в) для различных стадий развития облака (1 – стадия роста; 2 - стадии стабилизации и диссипации; 3 – прочие данные, не вошедшие в анализ предыдущих стадий).

В результате анализа были получены также средние нормированные спектры пульсаций горизонтальной  $\overline{\Phi}_u(k)$  и вертикальной  $\overline{\Phi}_v(k)$  компонент скорости ветра и пульсаций температуры  $\overline{\Phi}_T(k)$  для различных стадий развития облака (см. рис.2). Стадия роста облака характеризовалась воздушными движениями крупных масштабов - характерный масштаб движений  $\lambda_{max}$ , соответствовавший максимумам энергии в спектрах пульсаций, составил приблизительно 1700 - 1900 м. Масштабы  $\lambda_{max}$  для облаков на стадии стабилизации составили приблизительно 700 - 900 м. Отметим, что спектры для промежуточных стадий существенно отличались от спектров для стадий роста и стабилизации. Облака на стадии роста характеризовались в среднем существенно большей интенсивностью пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра и температуры, чем облака на стадии стабилизации (см. Табл.1).

Расчет коэффициента турбулентной диффузии  $K_m$  производился по модифицированной формуле Ляпина, погрешность которой составила 20–25% [6, 7]:

$$K_m = \frac{\sigma_w^2 U \overline{\Delta t}}{\sqrt{2\pi} \sigma_u}, \quad (4)$$

где  $U$  - средняя воздушная скорость самолета, а  $\overline{\Delta t}$  - среднее время сохранения знака пульсаций. Согласно **Табл. 1** интенсивность турбулентного теплообмена в облаках на стадии роста была в три раза выше, чем в зрелых и диссипирующих облаках.



Существование различий в статистических распределениях  $\sigma_w$  для растущих и диссипирующих Cu cong были показаны различными авторами - для средней полосы (Украина [8]) и облаков тропической зоны (по данным Байерса и Брейама [2]). Нами также были обнаружены существенные различия между функциями распределения  $\Psi(\sigma_w)$  для конвективных облаков, находящихся на различных стадиях развития (см. *Рис. 3а*). Так, вероятность обнаружить участки с заданным значением  $\sigma_w$  на стадии роста более чем вдвое превышала вероятность встречи зон с такой же интенсивностью в облаках стадии зрелого облака.

Таблица 1

**Средние значения параметров турбулентности и влажности для различных стадий развития конвективных облаков тропической зоны**

Стадия развития облака	$\overline{\sigma_u}$ , МС <sup>-1</sup>	$\overline{\sigma_w}$ , МС <sup>-1</sup>	$\overline{\sigma_T}$ , °С	$\overline{K_m}$ , М <sup>2</sup> С <sup>-1</sup>	$\overline{\Delta}$ , °С	$\overline{L_{wc}}$ , ГМ <sup>-3</sup>	$\overline{T_{wc}}$ , ГМ <sup>-3</sup>	$\overline{I_c}$
Стадия роста	1,39	2,35	0,48	202	0,53	0,88	1,28	0,69
Стадия стабилизации и диссипации	1,29	1,48	0,40	67	-0,25	0,59	0,95	0,56
Прочие стадии	1,29	1,54	0,42	83	-0,10	0,56	0,90	0,61

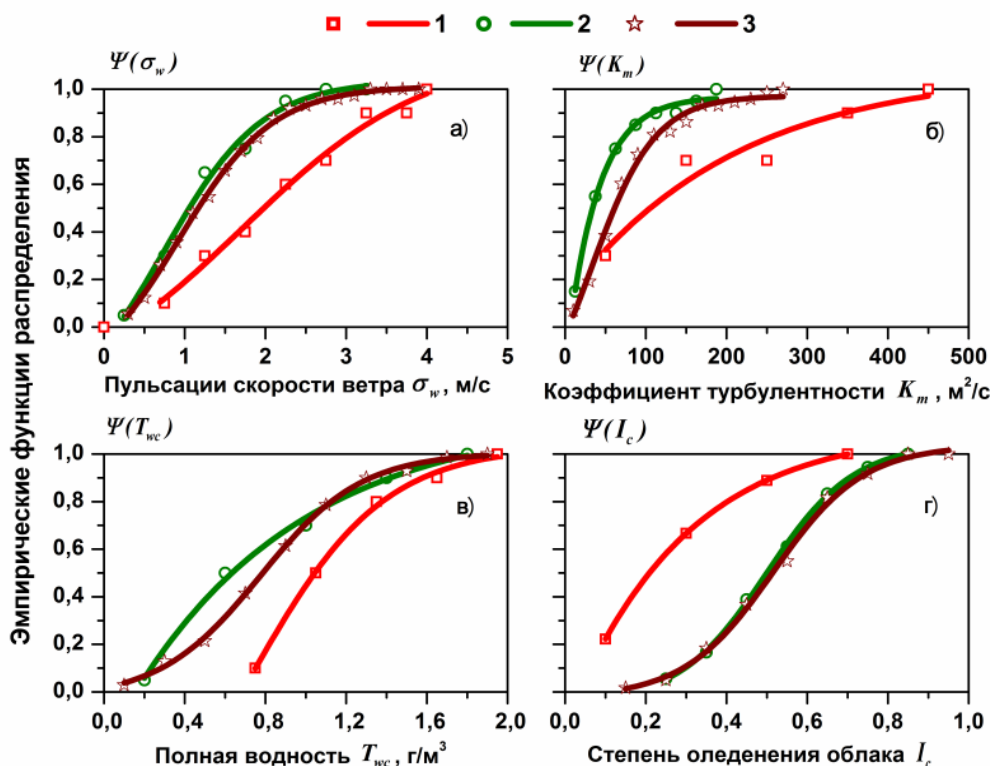


Рис.3. Эмпирические функции распределения (повторяемости) среднеквадратических пульсаций скорости ветра  $\Psi(\sigma_w)$  (а), коэффициента турбулентности  $\Psi(K_m)$  (б) полной влажности  $\Psi(T_{wc})$  (в), и степени оледенения  $\Psi(I_c)$  (г) для облаков, находящихся на различных стадиях развития (1 – стадия роста; 2 – стадии стабилизации и диссипации; 3 – прочие стадии).

Как видно из рис. 3б, вероятность обнаружить величину коэффициента турбулентности  $K_m$ , не превышавшую заданную величину в облаках на стадиях роста и стабилизации отличалась весьма существенно (в несколько раз). Максимальные значения коэффициента турбулентности в облаках на стадии стабилизации не превышали  $200 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ , в то время как в облаках на стадии роста могли достигать величин  $800 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ . В табл. 1 и на рис. 3б приведены данные, относящиеся к другим стадиям развития облака. Отметим, что средние характеристики и распределения параметров турбулентности для промежуточных стадий были близки к характеристикам для стадии стабилизации и диссипации, быть может, несколько в сторону увеличения. В то же время данные для стадии роста облака существенно, в несколько раз, отличались от данных для прочих стадий.

### **Взаимосвязь характеристик турбулентности и водности в конвективных облаках на различных стадиях их развития**

Ввиду нелинейности процессов образования и роста облачных капель и кристаллов, взаимосвязь между характеристиками турбулентности и водности в конвективных облаках можно обнаружить сопоставлением их интегральных величин (жидко-капельной водности  $L_{wc}$ , полной водности  $T_{wc}$  и степени оледенения облака, т.е. соотношения

$$I_c = \frac{T_{wc} - L_{wc}}{T_{wc}}).$$

Показано, что в среднем, полная водность в облаках на стадии роста была значи-

чимо выше, чем на стадии стабилизации (см. табл. 1). В то же время облака, находившиеся на стадии стабилизации и диссипации, имели существенно большую степень оледенения.

Эмпирические функции распределения (накопленные повторяемости) величин полной водности  $\Psi(T_{wc})$  и степени оледенения облака  $\Psi(I_c)$ , представлены на рис. 3в и г. Как видно из рисунков, вероятность встретить заданную полную водность  $T_{wc}$  в облаках на стадии роста оказалась существенно выше, чем в зрелых облаках. В то же время степень оледенения в зрелых облаках была заметно выше, чем в облаках на стадии роста. Очевидно, что облака, находящиеся на стадии стабилизации, обладающие меньшей водностью и относительно большим количеством ледяных частиц, были менее пригодны для воздействий, чем облака в стадии роста. На стадии роста облаков крупномасштабные вертикальные движения высокой интенсив-

ности обеспечивали быстрый подъем воздушных масс, интенсивный рост капель и ледяных частиц (и, соответственно, увеличение водности облака) и выделение энергии за счет процессов конденсации и кристаллизации. На стадии зрелого облака интенсивность вертикальных движений существенно ослабевала, поскольку значительная часть водяного пара в облаке уже сублимировалась на кристаллах, а поступление дополнительной энергии за счет фазовых переходов снижалось или прекращалось. При этом мезо-масштабные воздушные движения резко ослабевали и начинали превалировать чисто турбулентные, с масштабами ~ 500 м. Мелкокомасштабная турбулентность (с масштабами менее 500 м) приводила к перераспределению тепловой энергии внутри облака и выравниванию градиентов, что могло служить еще одной причиной прекращения роста облака или его диссипации.

### **Заключение. Рекомендации по использованию данных о структуре турбулентности для работ по активным воздействиям**

Согласно известным критериям [1], наибольший эффект от воздействий ожидается при введении реагентов в растущее конвективное облако, которое обладает вертикальной мощностью от 6 до 8 км; температурой в районе вершины облака в пределах от -8 до -20°C; средней водностью 0,3 - 0,5 гм<sup>-3</sup>; вертикальной мощностью переохлажденной части облака не менее 1000 м; скоростями восходящих воздушных потоков более 1,5 – 2,0 мс<sup>-1</sup>; и высотой основания облака не более 2000 м. Кроме того, в ряде случаев выдвигается требование об удалении облака, подвергающегося воздействию, более чем на 40 км от других кучево-дождевых облаков. Проведенный выше анализ динамической и микрофизической структуры конвективных облаков позволил сформулировать несколько новых выводов и рекомендаций по применению сведений о структуре воздушных движений в конвективных облаках в целях активных воздействий на них и оценки результатов воздействий.

1. Показано, что по своим динамическим характеристикам (спектрам и коспектрам турбулентности) растущие конвективные облака существенно отличались от облаков, находящихся на стадии стабилизации (зрелого облака) или на стадии диссипации. В растущем облаке энерго-несущие масштабы вихрей и интенсивность турбулентной диффузии в три раза превышали аналогичные параметры для зрелого облака. Величина перегрева воздуха внутри облака по отношению к окружающему облако пространству составляла: в растущих облаках – от 0,25 до 0,90°C; в зрелых облаках -  $\pm 0,10^\circ\text{C}$ ; в диссипирующих облаках – от -0,20 до -0,60°C. Средние значения пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра в облаках на стадии роста составляли около 2,0 мс<sup>-1</sup>, а в облаках на стадии стабилизации - около 1,4 мс<sup>-1</sup>.

2. Обнаружено различие в микрофизических характеристиках конвективных облаков, классифицированных по спектральным характеристикам турбулентных движений в облаках. В среднем, растущие конвективные облака обладали существенно меньшей степенью оледенения, имели большие величины полной и жидко-капельной водности по сравнению с облаками зрелой стадии развития (т.е. обладали большим потенциалом для проведения воздействий). Во всех случаях полная водность в растущих облаках превышала  $0,7 \text{ гм}^{-3}$ , а в облаках на стадии стабилизации -  $0,2 \text{ гм}^{-3}$ .

Таким образом, несмотря на то, что некоторые характеристики облаков на стадиях роста и стабилизации (вертикальная мощность облака, горизонтальные размеры облака, температура в облаке на уровне исследований) практически совпадали, степень пригодности облаков для воздействий существенно различалась.

3. Показано, что большинство критериев (относительное время жизни облака, степень оледенения облака, форма нормированных спектров и коспектров турбулентных пульсаций) могли быть применены для оценки результатов воздействий только при послеполетном анализе результатов воздействий, поскольку требовали выполнения громоздких расчетных процедур.

4. В качестве удобного критерия для оценки степени пригодности конвективного облака для воздействий предложена величина перегрева воздуха в облаке относительной окружающей среды, которая позволяет однозначно выделить стадию роста облака.

5. Предлагается оперативный способ определения стадии развития облаков, который основан на дистанционном измерении температуры воздуха в облаке с помощью бортового инфракрасного радиометра и контактном измерении температуры воздуха с помощью самолетного термометра. Такой метод позволяет сократить время оценки характеристик облака и проводить воздействия на облака, находящиеся в стадии развития, оптимальной для выполнения воздействий.

### ***Список литературы***

1. Берюлев Г.П., Беяев В.П., Данелян Б.Г. и др. Оценка эффективности воздействий и количества дополнительных осадков из конвективных облаков. – Метеорология и гидрология, 1995, № 4, с. 66-86.
2. Боровиков А.М., Гайворонский И.И., Зак Е.Г. и др. Физика облаков. – Л., Гидрометеиздат, 1961, 460 с.
3. Мартинес Д., Беяев В.П., Петров В.В. Характеристики турбулентности в конвективных тропических облаках. - Труды ЦАО, 1991, вып. 175, с. 61–73.
4. Синькевич А.А. Исследование термических характеристик мощных кучевых облаков с помощью ИК радиометров. - Метеорология и гидрология, 1984, № 1, с. 40–44.

5. Струнин А.М. Влияние влажности облака на расчеты спектральных характеристик полей температуры и турбулентных потоков тепла в зоне кучевых облаков по данным самолетных наблюдений. - Метеорология и гидрология, 2013, № 7, с. 53–64.
6. Струнин М.А. Исследования динамической структуры тропических конвективных облаков. - Мир измерений, 2009, № 7, с. 22–30.
7. Струнин М.А, Шметер С.М. Коэффициент атмосферной турбулентности и экспериментальные методы его определения. - Метеорология и гидрология, 1994, № 5, с. 10-19.
8. Шметер С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. - Л., Гидрометеиздат, 1987, 287 с.
9. 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., 1998, No 15, pp. 2117–2151.
10. Strunin A.M. and Zhivoglotov D.N. A method to determine true air temperature fluctuations in clouds with liquid water fraction and estimate water droplet effect on the calculations of the spectral structure of turbulent heat fluxes in cumulus clouds based on aircraft data. - Atmos. Res., 2014, vol. 138, No 1, pp. 98–111.

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ САМОЛЕТНОЙ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ЗАРЯДА САМОЛЕТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЛАКОВ**

**Торгунаков Р.Е., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А.**

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

Измерение электрических характеристик облаков имеет важное фундаментальное значение при комплексных исследованиях облаков и исследованиях токов глобальной электрической цепи, позволяя выявить природу процессов, ведущих к электризации грозовых облаков, в целях прогноза и управления ими, выяснить роль электрических сил в образовании облаков и осадков, усовершенствовать критерии «грозоопасности», получить возможность снижения электризации самолётов и увеличения безопасности полётов.

## Измерения электрического поля и заряда летательного аппарата

Измерение электрических полей в атмосфере с летательных аппаратов является непростой задачей. Присутствие самолета крайне сильно искажает внешнее поле, особенно в условиях сильных электрических полей. Вызываемая самолетом турбулентность и уносимый выхлопными газами его двигателей заряд вносят дополнительные погрешности, варьирующиеся от одного самолета к другому. Поэтому, при измерении электрических полей с самолетов перед исследователями в первую очередь стоит задача калибровки бортовых измерителей, т.е. определения коэффициентов искажения электрического поля самолетом и его собственным зарядом.

Для измерения электрических полей в атмосфере с самолетов в настоящее время используются электростатические флюксометры, которые располагают на внешней поверхности корпуса летательного аппарата наиболее оптимальным из доступных способов. Калибровка датчиков может быть проведена различными способами: с помощью масштабного моделирования [7-8], компьютерного моделирования [5] или с помощью выполнения специальных калибровочных полетов в условиях хорошей погоды, когда значения электрических полей могут быть оценены с достаточной точностью [1-4]. Каждый из этих методов имеет как достоинства, так и существенные недостатки. Наиболее перспективным представляется комбинированное использование этих методов для последовательного уточнения калибровочных коэффициентов.

В данном материале рассмотрена методика определения калибровочных коэффициентов при помощи физико-математического моделирования искажений однородного поля проводящим заряженным эквипотенциальным планером.

Выходной сигнал  $i$ -го флюксометра, расположенного на самолете и реагирующего на компоненты внешнего поля и заряд летательного аппарата можно представить в виде:

$$a_i = M_{ix}e_x + M_{iy}e_y + M_{iz}e_z + M_{iQ}Q, \quad (1)$$

где  $e_x, e_y, e_z$  – компоненты измеряемого электрического поля в системе координат, связанной с самолетом;

$Q$  – собственный заряд летательного аппарата;

$M_i$  – коэффициенты формы для  $i$ -го датчика.

Для продолжительных во времени измерений и  $m$  установленных на борту ЛА датчиков получим следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} a_1 = M_{1x}e_x + M_{1y}e_y + M_{1z}e_z + M_{1Q}Q \\ a_2 = M_{2x}e_x + M_{2y}e_y + M_{2z}e_z + M_{2Q}Q \\ \vdots \\ a_m = M_{mx}e_x + M_{my}e_y + M_{mz}e_z + M_{mQ}Q, \end{cases} \quad (2)$$

Систему уравнений 2 можно представить в виде матричного уравнения:

$$\mathbf{a} = \mathbf{M}\mathbf{e}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{a}$  – вектор выходных значений полезного сигнала флюксметров;

$\mathbf{e}$  – вектор значений внешнего электрического поля и заряда летательного аппарата;

$\mathbf{M}$  – калибровочная матрица размером  $m \times 4$ .

Матрица  $\mathbf{M}$  показывает отношение выходного сигнала любого из датчиков относительно внешнего электрического поля и собственного заряда летательного аппарата. Матрица  $\mathbf{M}$  постоянна и уникальна для каждого конкретного самолета и расположения датчиков. С помощью матрицы  $\mathbf{M}$  можно однозначно определить величину напряженности поля на выходе любого из датчиков и вектор  $\mathbf{a}$ , зная значения компонент вектора  $\mathbf{e}$ . Однако, в ходе эксперимента мы измеряем значения вектора  $\mathbf{a}$ , а получить необходимо, в свою очередь, как раз значения вектора  $\mathbf{e}$ .

Решая уравнение (3) относительно  $\mathbf{e}$ , получим:

$$\mathbf{e} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{a}, \quad \mathbf{e} = \mathbf{B}\mathbf{a}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{B}$  – матрица, обратная матрице  $\mathbf{M}$ .

Элементы матрицы  $\mathbf{B}$  аналогично элементам матрицы  $\mathbf{M}$  показывают взаимосвязь между векторами  $\mathbf{e}$  и  $\mathbf{a}$ .

### Моделирование электростатических полей

При построении моделей в ходе данного исследования использовались компьютерные расчеты электрического поля. Построение моделей осуществлялось в программе комплексного моделирования электромагнитного поля при разработке и анализе 3D/2D-систем Maxwell с помощью решателя Electrostatic Solver.

Моделируемый объект (самолет) задавался объемной моделью равномерно заряженного металлического тела, изготовленного из алюминия. Модель самолета должна быть изготовлена заранее, например, с помощью системы автоматизированного проектирования или программы трехмерного моделирования. Граничные условия задавались электрическими потенциалами на границах модельной области.

Методика проиллюстрирована на примере моделей самолетов-лабораторий Ил-14 и Як-42Д. На рис. 1 приведена картина искажений однородного электрического поля в присутствии заряженного самолета. Поле непосредственно вблизи самолета в значительной степени обусловлено не внешним полем, а собственным зарядом самолета, и направлено по нормали ко всем поверхностям.

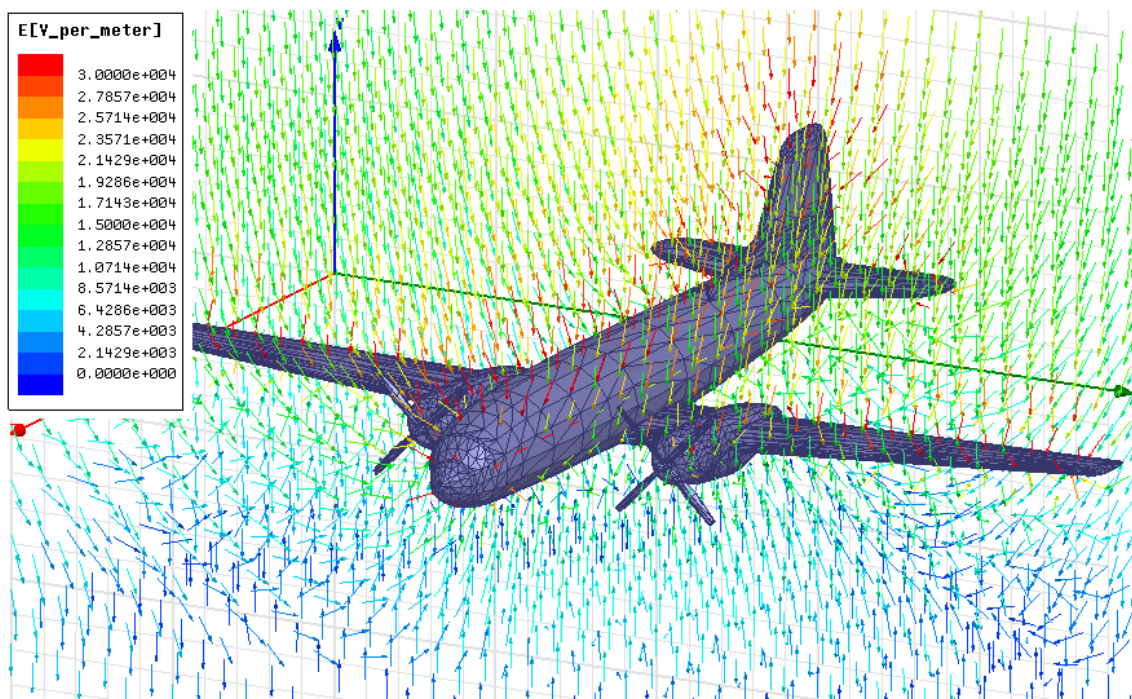


Рис. 1. Модель сильно заряженного самолета Ил-14 в однородном электрическом поле.

### Использование компьютерного моделирования при разработке рекомендаций по установке датчиков на летательном аппарате

При определении оптимального расположения датчиков необходимо учитывать существование ограничений на расположение датчиков на корпусе самолета, например, близость топливных баков, рулевых тяг, антенн и датчиков, которыми насыщены современные самолеты-лаборатории. Основными путями уменьшения ошибки измерения напряженности электрического поля с летательных аппаратов являются [9]:

- 1) оптимальное расположение датчиков;
- 2) уменьшение погрешностей самих датчиков;
- 3) уменьшение погрешностей определения коэффициентов формы матрицы **B**.

Для определения положения электрических нейтралей модель самолета помещается в однородное внешнее поле, направленное вдоль одной из осей связанной системы координат, и строится картина распределения наведенного полем заряда по поверхности летательного аппарата. Электрической нейтралью является линия на поверхности, вдоль которой заряд равен нулю.

В качестве примера, приведен результат моделирования заряда по поверхности самолета Ил-14, помещенного в электрическое поле, направленное вдоль продольной оси.



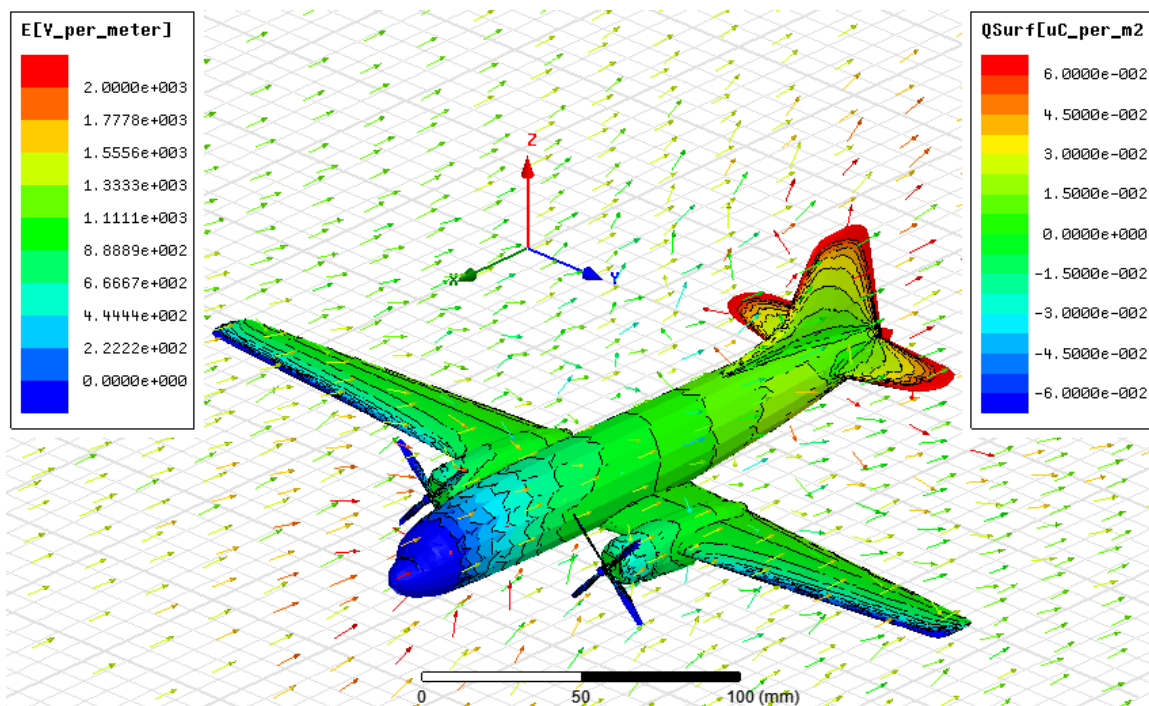


Рис. 2. Распределение заряда на поверхности самолета Ил-14, помещенного в продольное электрическое поле  $E_x = 1000$  В/м.

Расположение электронейтралей самолета Ил-14, полученное в результате моделирования электрического поля, направленного по всем трем осям, приведено на рис. 3. Самолета Як-42Д – на рис. 4.

При размещении датчиков на летательном аппарате следует придерживаться следующих рекомендаций:

- 1) использовать для измерений от 4 до 6 и более датчиков;
- 2) располагать датчики на электрических нейтралях или на их пересечениях;
- 3) располагать датчики на плоских частях фюзеляжа;
- 4) не располагать датчики вблизи диэлектрических элементов конструкции летательного аппарата, заостренных и выступающих частей корпуса, других датчиков, антенн и других элементов радиоэлектронного оборудования, двигателей и других подвижных частей конструкции летательного аппарата;
- 5) располагать датчики таким образом, чтобы они были направлены в стороны действия всех трех компонент внешнего поля, не направлять все датчики в одну сторону.

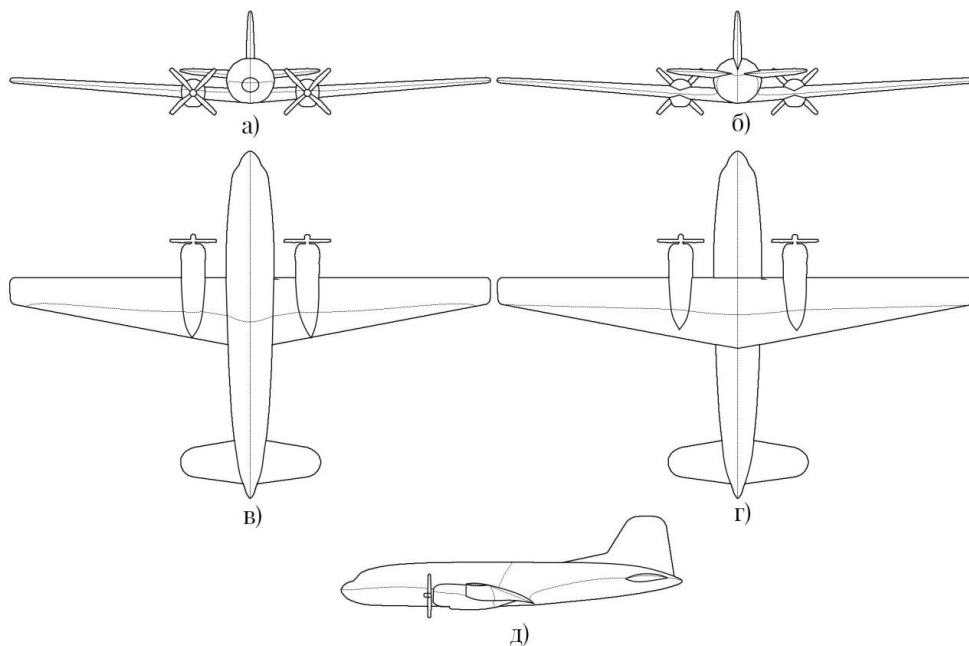


Рис. 3. Расположение электронейтралей на поверхности самолета Ил-14:  
 а) вид спереди, б) вид сзади, в) вид сверху, г) вид снизу, д) вид слева.

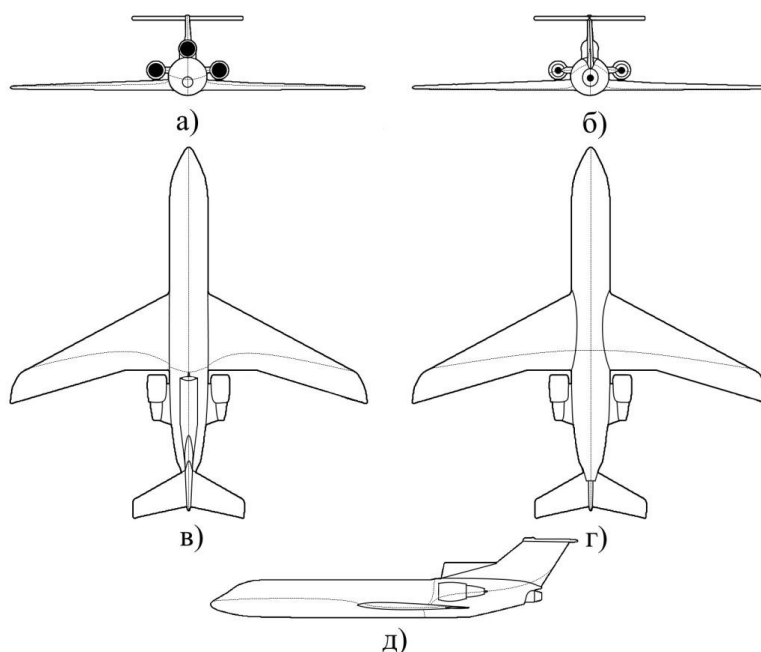


Рис. 4. Расположение электронейтралей на поверхности самолета Як-42Д:  
 а) вид спереди, б) вид сзади, в) вид сверху, г) вид снизу, д) вид слева.

### Результаты расчетов коэффициентов формы летательного аппарата на основе данных компьютерного моделирования

В качестве исходных данных для расчета используются значения напряженности электрического поля в точках установки датчиков, полученные в результате моделирования при различных заданных условиях. Расчетные значения калибровочных матриц **В** приведены в табл. 1, 2.

**Калибровочная матрица В для самолета лаборатории Ил-14**

	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>
E <sub>X</sub>	-0,181	-0,259	0	0,051
E <sub>Y</sub>	0,945	0,135	-2,094	0
E <sub>Z</sub>	-0,245	0,319	0	0
Q (Кл/В·м)	-2,59E-09	-3,36E-09	0	0

Таблица 2

**Калибровочная матрица В для самолета лаборатории Як-42Д**

	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>
E <sub>X</sub>	-0,149	-0,192	0,032	0,030	0,263	0,176
E <sub>Y</sub>	-0,014	-0,001	-0,453	0,463	-0,004	-0,015
E <sub>Z</sub>	-0,083	0,165	-0,040	-0,038	0,092	-0,130
Q (Кл/В·м)	-6,43E-10	-8,35E-10	0	0	0,000	0,000

**Выводы**

1. Рассмотренная методика физико-математического моделирования электростатических полей позволяет определять расположение электрических нейтралей на летательном аппарате, выработать рекомендации по оптимальному расположению датчиков на летательном аппарате, производить расчет матриц калибровочных коэффициентов на основе полученных в результате моделирования данных.
2. Впервые для решения задачи определения матрицы калибровочных коэффициентов использовалась правдоподобная 3-D модель летательного аппарата. За счет детерминированности начальных условий моделирования методика позволяет определять не только наведенное собственным зарядом самолета поле в относительных единицах, но и сам заряд самолета.
3. Метод компьютерного моделирования значительно точнее метода масштабного моделирования за счет возможности более глубокой проработки мелких деталей, точного подбора материалов, не вносит погрешностей ручных измерений и измерительных приборов.
4. Ввиду крайней редкости и уникальности экспериментов по измерению напряженности электрического поля с летательных аппаратов и сложности оценки их погрешностей применяющиеся способы определения матриц калибровочных коэффициентов требуют серьезного уточнения и использования комплексного подхода к первоначальной оценке калибровочных матриц и их дальнейшей корректировке.
5. Разрабатываемая методика будет использована при разработке алгоритмов расчета электрических полей и собственного заряда самолета ЯК - 42 «РОСГИДРОМЕТ».

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 16-05-0019\_a, 16-05-05719\_a, 17-05-00965\_a, 17-55-80048 БРИКС\_a.

### *Список литературы*

1. Bateman M.G., Stewart M.F., Podgorny S.J., Christian H.J., Mach D.M., Blakeslee R.J., Bailey J.C., Daskar D. A Low-Noise, Microprocessor-Controlled, Internally Digitizing Rotating-Vane Electric Field Mill for Airborne Platforms, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 24, 1289-1302, American Meteorological Society, 2007.
2. Blakeslee, R.J., Christian H.J., and Vonnegut B.. Electrical measurements over thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 94(D11), 13135–13140, American Geophysical Union, 1989.
3. Dye J.E., Lewis S., Final Report to NASA KSC on the Airborne Field Mill Project (ABFM), National Center for Atmospheric Research, Colorado, 2001.
4. Koshak W.J. Retrieving Storm Electric Fields from Aircraft Field Mill Data. Part I: Theory, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 23, 1303-1322, American Meteorological Society, 2006.
5. Winn W.P., Aircraft Measurement of Electric Field: Self-Calibration, *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, 7351-7365, American Geophysical Union, 1993.
6. Белов Б.А., Евтеев Б.Ф., Михайловский Ю.П. О точности измерений напряженности электрического поля атмосферы и заряда самолета с помощью самолетов – лабораторий. // Вопросы атмосферного электричества. Сб. статей. — 1990. — с.138-146
7. Имянитов И.М. Электризация самолетов в облаках и осадках. — Л.: Гидрометеиздат. — 1970.
8. Имянитов И.М., Чубарина Е.В. Электричество свободной атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. — 1965.
9. 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. — № 16. — г. Муром. — 2014. — с.41-45.
10. Синькевич А.А. Создание комплекса самолетной метеорологической аппаратуры, разработка методики ее применения и результаты экспериментальных исследований облаков: Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук. // Гл. геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. — СПб. — 1992.
11. Торгунаков Р.Е., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А. О методике измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда летательного аппарата. // Труды ГГО. — 2015. — вып. 579. — с. 214-231.

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАКОВ В СТАДИИ ВЫПАДЕНИЯ ГРАДА

Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Циканов Х.А.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Исследования проведены на основе статистического анализа результатов совмещенных во времени наземных и радиолокационных наблюдений характеристик градовых осадков в стадии выпадения града. Материал исследования включает данные о 619 случаях выпадения града с 2010 до 2016 год в Ставропольском и Краснодарском краях, Адыгее, Карачаево-Черкесии, Кабардино-Балкарии и Северной Осетии.

Наземные данные включают в себя информацию о дате, времени выпадения и размере града, зафиксированных метеостанциями и ракетными пунктами воздействия на градовые процессы Ставропольской, Краснодарской и Северо-Кавказской ВС Росгидромета. Радиолокационные данные включают результаты измерений комплекса одномерных, двумерных и трехмерных радиолокационных параметров градовых облаков в моменты времени, когда на земле отмечено выпадения града из них.

Радиолокационные наблюдения проводились с помощью Ставропольского, Куба-Табинского, Кахунского и Ардонского радиолокаторов МРЛ-5, оснащенных автоматизированной системой обработки радиолокационной информации «АСУ-МРЛ» [1]. Для совместимости данных этих радиолокаторов их калибровка была выполнена по единой методике по солнечному радиотепловому излучению [2]. Проводились непрерывно с периодичностью обзора пространства около 3,5 минут. Это дало возможность совмещения во времени данных наземных и радиолокационных наблюдений с расхождением не более  $\pm 2$  минут.

В данной работе приводятся результаты предварительного анализа полученных данных с целью изучения пределов вариации и повторяемости:

- размера и площади выпадения града в регионе Северного Кавказа;
- высоты изотерм  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  в дни с градом;
- максимальной радиолокационной отражаемости градовых облаков ( $Z_{\max}$ , dBZ);
- высот верхней границы изолиний  $Z_{\max} = 15, 25, 35, 45, 55$  и  $65$  dBZ над уровнем моря ( $H_{15}, H_{25}, H_{35}, H_{45}, H_{55}, H_{65}$ ) и над уровнем изотермы  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta H_{25}, \Delta H_{35}, \Delta H_{45}, \Delta H_{55}, \Delta H_{65}$ ) в км;
- объемов радиозеха градового облака внутри изолиний  $Z_{\max} = 15, 25, 35, 45, 55$  и  $65$  dBZ ( $V_{15}, V_{25}, V_{35}, V_{45}, V_{55}, V_{65}$ ) и объемов их переохлажденной части ( $\Delta V_{15}, \Delta V_{25}, \Delta V_{35}, \Delta V_{45}, \Delta V_{55}, \Delta V_{65}$ ) в км<sup>3</sup>;

- интегрального водосодержания градовых облаков внутри изолиний  $Z_{\max} = 15, 25, 35, 45, 55$  и  $65$  dBZ над уровнем моря ( $M_{15}, M_{25}, M_{35}, M_{45}, M_{55}, M_{65}$ ) и водосодержания их переохлажденной части ( $\Delta M_{15}, \Delta M_{25}, \Delta M_{35}, \Delta M_{45}, \Delta M_{55}, \Delta M_{65}$ ) в килотоннах;
- вертикально интегрированного водосодержания (VIL) всей толщи облаков ( $Q_m$ ), слоя выше изотермы  $0^\circ\text{C}$  ( $\Delta Q_0$ ) и слоя выше изотермы  $-6^\circ\text{C}$  ( $\Delta Q_{-6}$ ) в  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;
- частоты внутриоблачных грозовых разрядов (VHF) и разрядов облако-земля положительной (LF+) и отрицательной (LF-) полярности в мин, а также суммарного тока положительных и отрицательных разрядов облако-земля в кА).

Алгоритмы измерения этих характеристики градовых облаков изложены в [3].

На рис. 1 представлена повторяемость размера и площади выпадения града. Из него следует, что размер града варьирует от 0, до 6,0 и более см, но чаще всего выпадает град диаметром  $d = 0,5 - 1,0$  см. С увеличением его размера повторяемость случаев града быстро уменьшается, так, что выпадение града диаметром более 3 см отмечается лишь в 6,5 процента случаев. Площадь градовых осадков по радиолокационным данным в случаях выпадения мелкого града слабой интенсивности может составлять  $0,1 - 0,5 \text{ км}^2$ , а в случае крупномасштабных градовых процессов (например, 19.08.2015 г.) может достигать  $168 \text{ км}^2$  и более. Чаще всего площадь выпадения града варьирует в пределах от 5 до  $50 \text{ км}^2$ .

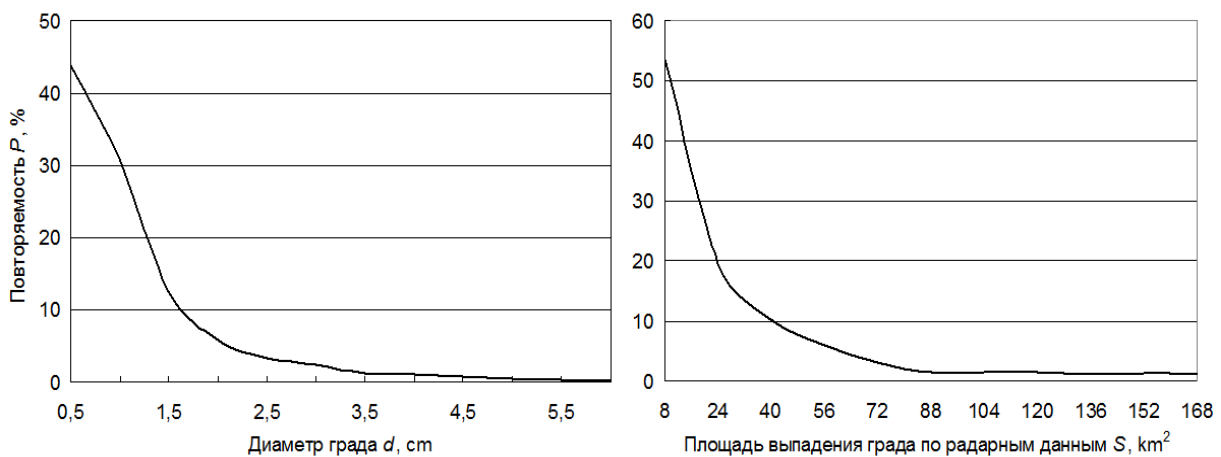


Рис. 1. Графики повторяемости: **a)** размера града; **b)** площади выпадения града.

На рис. 2 приведены графики повторяемости высоты изотермы  $0^\circ\text{C}$  ( $H_0$ , км) и высоты изотермы  $-6^\circ\text{C}$  ( $H_{-6}$ , км) – уровня ракетного засева градовых облаков с целью предотвращения града. Из этого рисунка следует, что мощные градовые процессы с сильным градом чаще отмечаются при более высоких значениях  $H_0$  и  $H_{-6}$ , чем слабые и умеренные градобития.

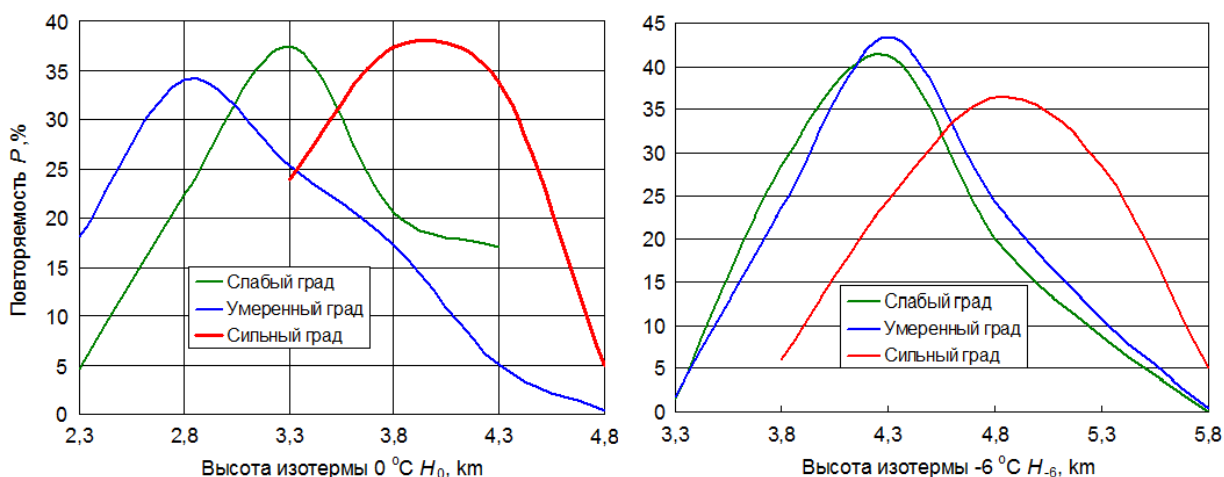


Рис. 2. Графики повторяемости высот: *a)* изотермы 0 °С; *b)* изотермы -6 °С.

На рис. 3 можно видеть пределы вариации параметров, применяемых для распознавания градовых облаков и объектов воздействия: максимальной радиолокационной отражаемости градовых облаков ( $Z_m$ , dBZ); высоты повышенного радиозэха ( $\Delta H_{45}$ ). Максимум повторяемости слабого града чаще отмечается при значении  $Z_m \approx 53$  dBZ с пределами вариации от 33 до 63 dBZ (рис. 3*a*). Следует отметить, что значения  $Z_m = 33 - 45$  dBZ зафиксированы весной при низкой высоте  $H_0$ , когда ледяная даже крупа не успевает растаять в теплой части атмосферы.

Наиболее часто умеренный и сильный град отмечаются при  $Z_m \approx 63$  и 68 dBZ. В случае крупномасштабного сверхмощного градового процесса отмечены аномально высокие значения  $Z_m$ , достигающие 80 dBZ.

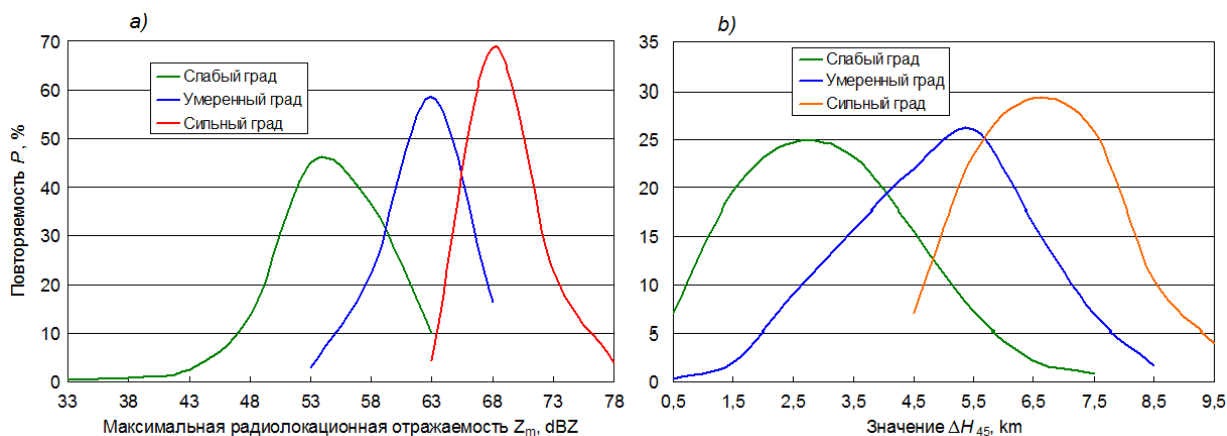


Рис. 3. Графики повторяемости: *a)* максимальной радиолокационной отражаемости  $Z_m$ ; *b)* высоты верхней границы радиозэха с  $Z = 45$  dBZ над уровнем  $H_0$ .

Следует отметить, что по мере усиления града значения  $\Delta H_{45}$  вполне естественно сдвигаются (как и значения  $Z_m$ ) в сторону повышенных значений параметра. Максимумы повторяемости слабых, умеренных и сильных градовых осадков отмечается, соответственно, при  $\Delta H_{45} = 3,0; 5,5$  м 6,5 км (рис. 3*b*).

На рис 4 представлены графики повторяемости объема (слева) и интегрального водосодержания (справа) градового очага, за который условно принят объем с  $Z_{45} > 45$  dBZ. Объемы градовых очагов ( $V$ , км<sup>3</sup>) минимальны в градовых облаках, из которых выпадает слабый град (не более 750 км<sup>3</sup>) и максимальны в облаках, из которых выпадает сильный град, достигая 3000 км<sup>3</sup>. Т.е., при вертикальной протяженности около 10 - 12 км площадь горизонтального сечения градового очага достигает 300 км<sup>2</sup>, с размером полуосей порядка 20x10 км. Интегральное водосодержание градового очага ( $M_{45}$ , т) может достигать в мощных градовых облаках  $1,4 \cdot 10^7$  тонн (или  $\lg M_{45} = 7,15$ ).

При этом вертикально интегрированная водность всей толщи градовых облаков ( $Q_m$ , кг/м<sup>2</sup>), известная в литературе как VII, достигает в случае сверхмощных градовых облаков значения от 80 до 170 кг/м<sup>2</sup> (рис. 5a). Это единовременное значение VII, которое изменяется во времени. Выпадение такого количества воды приводит к образованию слоя осадков на земле от 80 до 170 мм и, как правило, сопровождается формированием ливневых паводков, а в горах селей. Чаще всего VII градовых облаков имеет значения от 10 до 50 кг/м<sup>2</sup>. Значение вертикально интегрированного водосодержания слоя облаков выше изотерм 0 °C ( $\Delta Q_0$ ) и -6 °C ( $\Delta Q_{-6}$ ), т.е. слоя зарождения и роста града несколько меньше, чем всей толщи облака  $Q_m$ , но могут в сверхмощных градовых облаках достигать также значений более 100 кг/м<sup>2</sup>.

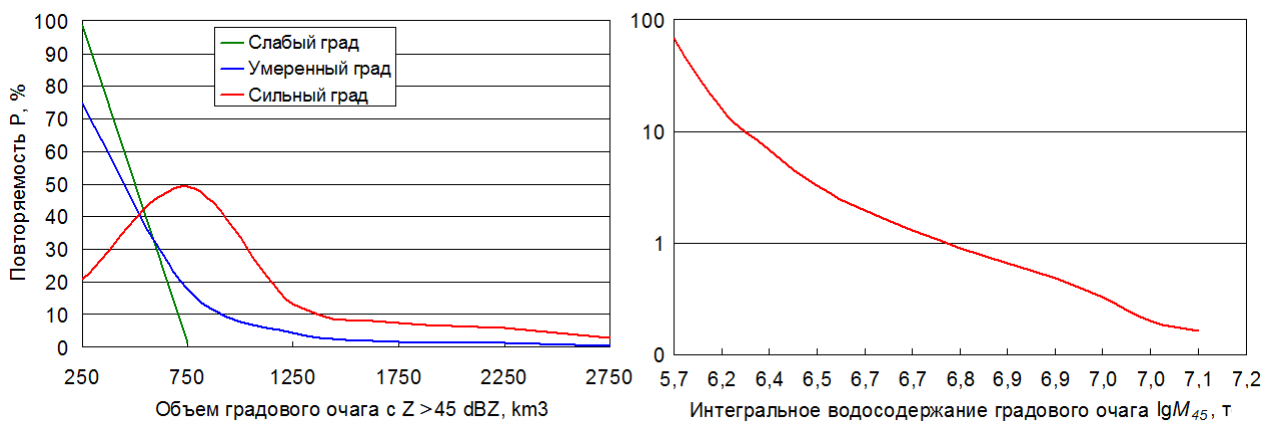


Рис. 4. Графики повторяемости объема и интегрального водосодержания градового очага.

Графики повторяемости интегрального водосодержания всего объема градовых облаков и объемов, ограниченных изолиниями  $Z = 15, 25, 35, 45, 55$  и  $65$  dBZ, представлены на рис. 5b. Из него следует, что основной вклад в суммарное водосодержание вносит градовый очаг, в котором даже водосодержание объема с  $Z > 65$  dBZ, где сосредоточен крупный может достигать  $3 \cdot 10^7$  тонн, что согласуются с данными, изложенными в [4].



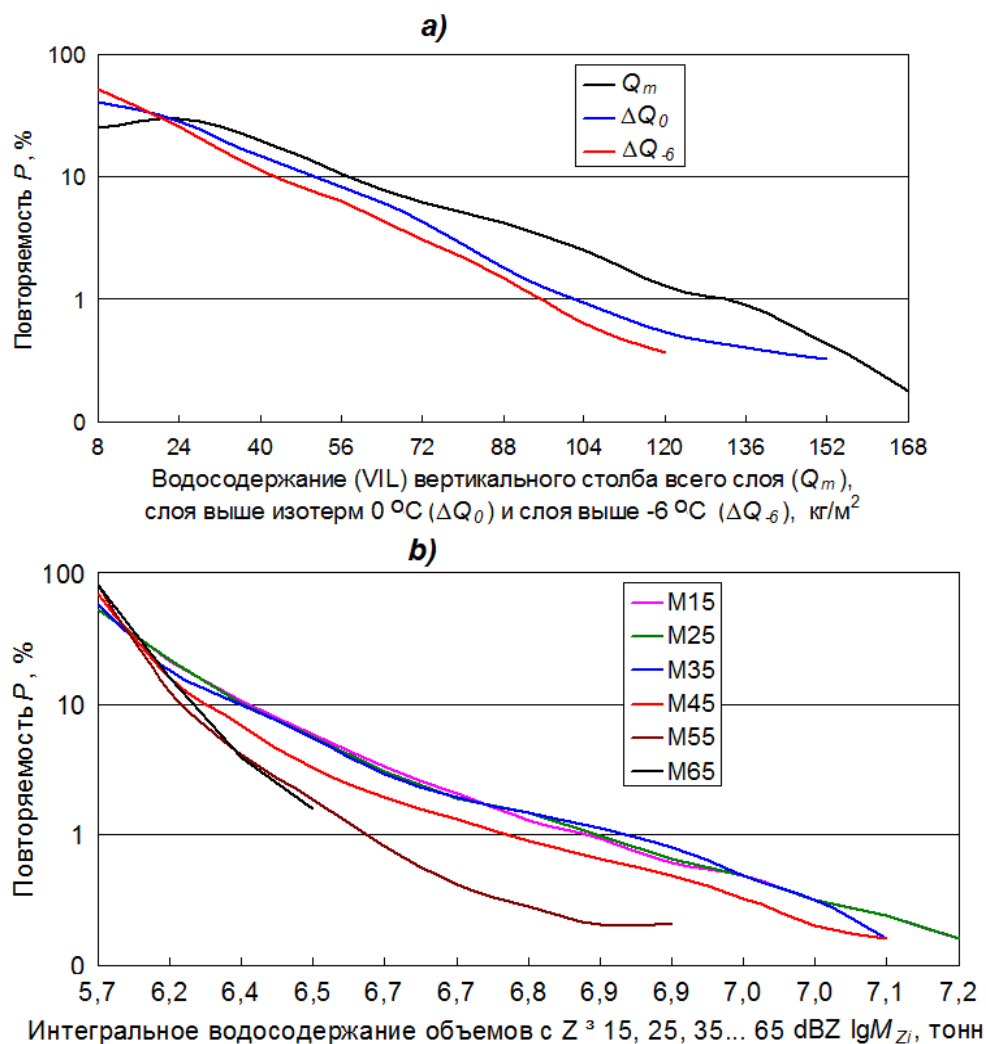


Рис. 5. Графики повторяемости водосодержания градовых облаков: **a)** интегрированного по вертикальному слою (VIL); **b)** интегрированного по объему.

На рис. 6 приведены графики частоты молниевых разрядов в градовых облаках. Данные о грозовых разрядах получены от сети грозопеленгаторов LS800 ФГБУ «ВГИ», которые автоматически сшиваются в системе «АСУ-МРЛ» и отображаются на фоне карты метеоявлений [5]. Из этого рисунка следует, что частота внутриоблачных разрядов (VHF) наиболее часто составляет от 5 до 100 разрядов в мин, достигая в случае мощных градовых процессов до 150 – 200 разрядов в мин и более. Число разрядов облако-земля положительной (LF+) и отрицательной (LF-) полярности гораздо меньше. Чаще всего частота таких разрядов варьирует в пределах от 0 до 10 в мин, достигая в случае особо мощных градовых процессов 100 и более в мин. Следует отметить, что частота всех типов разрядов увеличивается по мере увеличения радиолокационной отражаемости  $Z_m$ , градовых облаков, т.е. с повышением мощности градового облака и усилением градовых осадков.

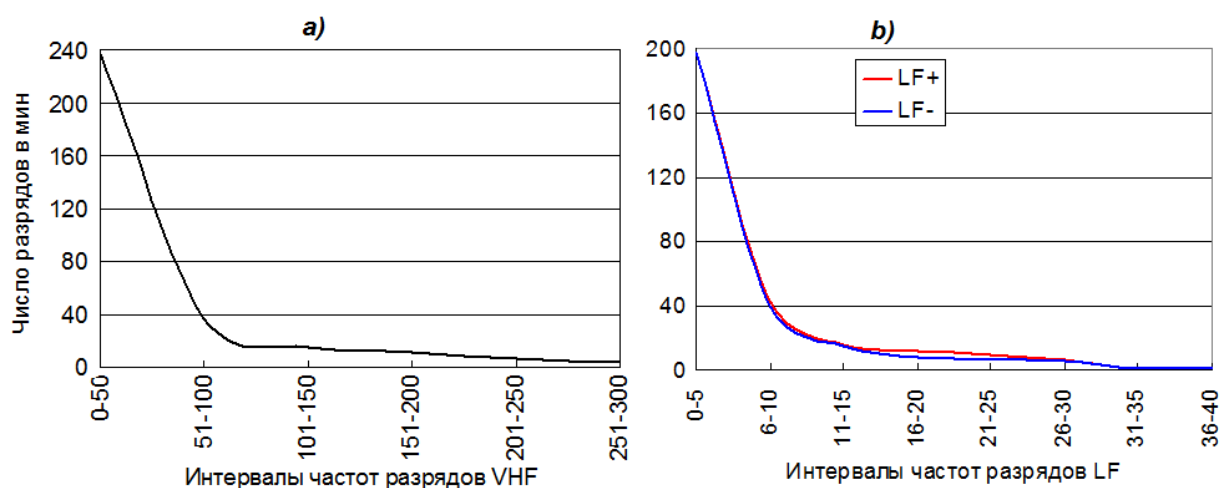


Рис. 6. Графики частоты внутриоблачных молниевых разрядов (VHF), разрядов облако-земля положительной (LF+) и отрицательной (LF-) в зависимости от радиолокационной отражаемости градовых облаков.

### Заключение

Представленные результаты о пределах вариации и значениях рассмотренных параметров могут быть использованы для дальнейшего развития методов обнаружения и предотвращения града и верификации теоретических моделей градовых облаков. Эти результаты являются предварительными и будут в дальнейшем детализованы.

### Список литературы

1. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации для целей штормоповещения и активного воздействия на облачные процессы // Сборник трудов XXVII Всерос. симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб. 2011. – С. 211-225.
2. Абшаев А.М., Гергоков А.Х., Чочаев А.Б., Геккиева Ж.М. Методы калибровки метеорологических радиолокаторов. – Метеорология и гидрология, 2017. № 3. – С. 115-121.
3. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Бареева М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. – Нальчик: – Изд. Печатный двор, 2014. – 508 с. ISBN 978-5-905770-54-8.
4. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Мизиева Ж.Ю. Радиолокационные исследования водосодержания кучево-дождевых облаков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2009, том 45, № 6. – С. 782-788.
5. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Аджиев А.Х., Стасенко Д.В., Кулиев Д.Д., Акимова И.И. О влиянии засева кристаллизующими реагентами на электрическую активность градовых облаков // Труды VII Всерос. конф. по атмосферному электричеству. – СПб, 2012. – С. 17-19.

# ОДНОПОЗИЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Е-Н ДАЛЬНОМЕРА И ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Коровин Е.А. <sup>1</sup>, Кононов И.И. <sup>2</sup>, Щукин Г.Г. <sup>1</sup>, Кулешов Ю.В. <sup>1</sup>, Чернышев С.В. <sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,  
г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет»,  
г. Санкт-Петербург

## Введение

Системы мониторинга грозовой активности [1] на основе приема электромагнитного излучения молниевых разрядов (МР) обладают значительным радиусом действия и позволяют, как правило, с достаточной точностью определять координаты МР. Наилучшими характеристиками обладают многопунктовые системы, реализующие разностно-дальномерный метод определения координат МР. Вместе с тем развертывание сети датчиков не всегда возможно, в связи с необходимостью обеспечения пространственно разнесенной системы устойчивой связью, временной синхронизацией и т.д., либо не оптимально по причине высокой стоимости. В этом случае применяются однопунктовые системы, построенные на основе грозопеленгаторов-дальномеров (ГПД) [2].

## Однопунктовые системы

Однопунктовые системы пассивной локации гроз позволяют на основе оценок азимута и дальности определять координаты МР. Оценивание азимута в таких системах производится на основе анализа амплитуд электрической и магнитной составляющих излучения МР. Погрешность определения азимута в ГПД не превышает единиц градусов, что удовлетворяет требованиям по точности на значительных дальностях.

Дальность или расстояние до МР в ГПД определяется во временной (с использованием т.н. фильтров-антитрасс), либо частотной (по различиям в фазовых спектрах электрической и магнитной составляющих атмосферика) областях. Для интервальной оценки дальности в зоне, ограниченной радиусом 56 км могут применяться амплитудные методы [3, 4]. Радиус рабочей зоны ГПД при использовании Е-Н алгоритмов не превышает 100 км, а погрешность оценок расстояния до МР 10-15% от дальности на дистанциях 20 - 80 км. При этом характерно значительное возрастание погрешности в интервалах до 20 км и от 80 до 100. В первом случае это связано с поляризационными погрешностями, вызванными отклонением канала молнии от

вертикали. Во втором случае погрешности вызваны нюансами реализации метода и обусловлены противоречием требований фильтрации помехи промышленной сети (до 300 Гц) и необходимостью анализа данной части фазового спектра E и H составляющих принимаемого сигнала.

Проблема повышения точности в диапазоне дальностей 80 – 100 км может быть решена за счет совместного применения ряда мер, таких как запись с последующим вычитанием из принимаемого сигнала помехи, применение цифровых фильтров большого порядка для удаления мешающих спектральных составляющих и аналого-цифровых преобразователей с большой разрядностью. Устранить поляризационные ошибки можно путем отказа от магнитных рамочных антенн и использованием для определения направления на источник атмосфера интерферометрической системы, состоящей из многоканального радиоприемного устройства и антенной решетки. При этом определение дальности возможно только амплитудным методом, не обеспечивающим достаточную точность в диапазоне частот антенной системы, имеющей разумные габариты.

Вместе с тем, имеется возможность оценивания дальности до МР путем анализа данных измерителей электрического поля Земли. Автоматизация процессов сбора и обработки данных, получаемых от этих приборов, позволила на основе моделей распределения зарядов в конвективной облачности в виде точечного заряда, либо точечного диполя [5], создать системы предупреждения об опасных атмосферных явлениях. Флюксометры обеспечивают заблаговременное, до возникновения первого разряда, выявление присутствия в атмосфере значительных зарядов. Недостатком является малый радиус действия одного датчика, область предупреждения не превышает 20 км [6] и возможность определения координат молний лишь в случае наличия сети, состоящей из не менее чем трех измерителей, с системой временной синхронизации, устойчивыми каналами связи и пунктом сбора и обработки данных.

### **Исходные данные**

Для реализации эксперимента были использованы данные по местоположению МР, имевших место в июле 2017 г в районе, ограниченном радиусом 100 км относительно датчика электрического поля, расположенного на крыше учебного корпуса ВКА им. А.Ф.Можайского, (рис 1). Данные о координатах МР определялись системой «Blitzortung» [9]. В качестве датчика электрического поля был использован флюксометр «Рябина» [7,8]. ГПД располагался на крыше учебного корпуса СПбГУ в Петергофе (~23 км от измерителя напряженности поля). На рис. 2 представлены данные по координатам МР, зафиксированным 13.07.2017 г системой «Blitzortung». В центре окружностей располагается прибор измерения электрического поля. Радиус окружностей кратен 25 километрам.



Рис. 1. Измеритель напряженности электрического поля «Рябина».

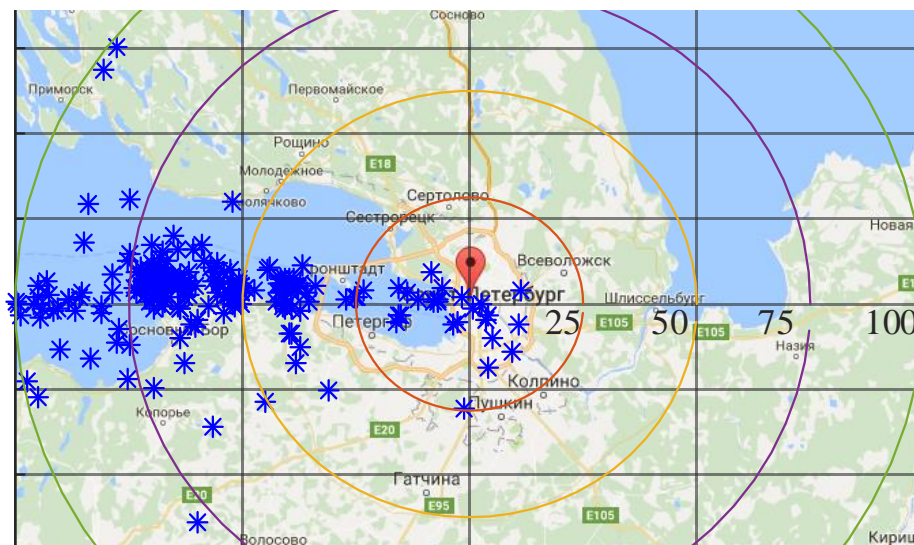


Рис. 2. Координаты отдельных МР, зафиксированных системой «Blitzortung» 13.07.2017 г. в Ленинградской области.

### Результаты эксперимента

Для определения максимального радиуса, в пределах которого возможна идентификация опасного явления, на основе данных системы «Blitzortung», формировались двумерные массивы, включающие время и дальность (до 80 км) до МР. Совместное представление информации о значении электрического поля и дальности до МР позволяет наглядно оценить возможности флюксметра и эффективность систем мониторинга по обнаружению МР.

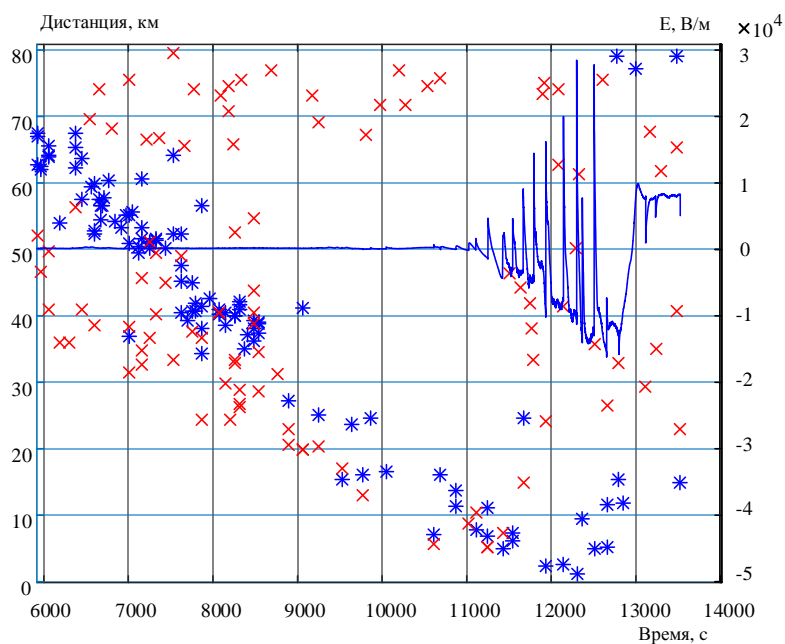


Рис. 3. Зависимость амплитуды скачков градиента электрического поля от расстояния до МР (\* - данные системы «Blitzortung», × – данные ГПД).

На рис 3 представлены значения напряженности электрического поля совместно с расстояниями до МР, определяемых системой «Blitzortung» и ГПД. Из графика рис 3 очевидна зависимость амплитуды скачка электрического поля от расстояния до МР (по данным системы «Blitzortung»), определяемая согласно модели точечного заряда известным выражением:

$$\Delta E = \frac{\Delta Q H}{4\pi\epsilon_0(R^2+H^2)^{3/2}},$$

где  $\Delta Q$  – величина заряда, нейтрализованного в результате МР,

$H$  – высота до области заряда;

$R$  – расстояние до проекции заряда на поверхность Земли.

Дальность, определяемая ГПД, особенно на расстояниях менее 10 км от МР, имеет значительную, достигающую 40 км погрешность.

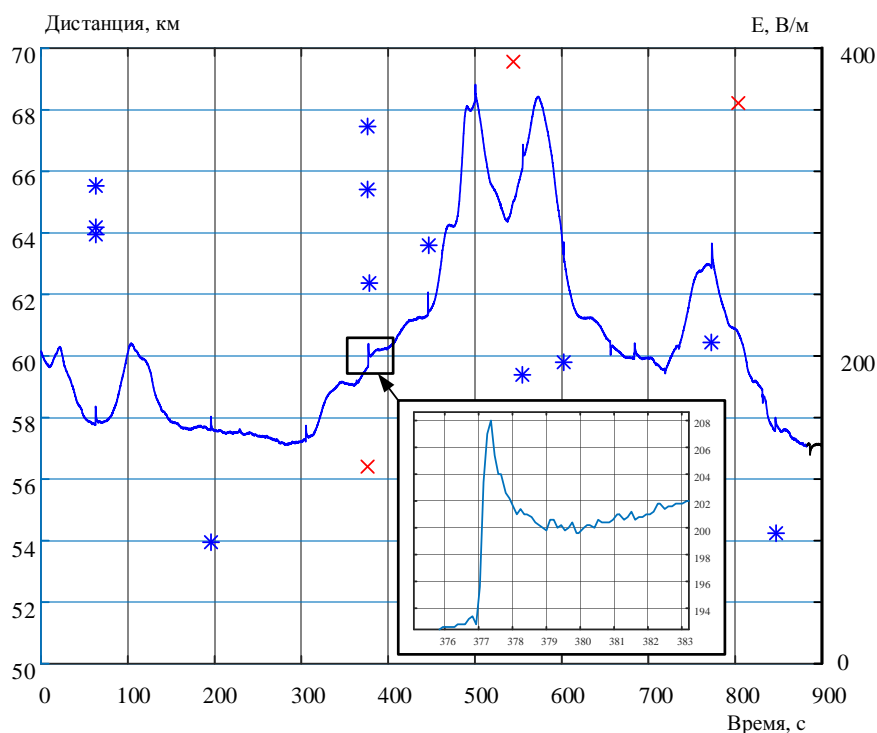


Рис. 4. Напряженность электрического поля на дистанции более 50 км от МР.

На рис. 4 представлены данные измерителя электрического поля, демонстрирующие возможности прибора по обнаружению атмосфериков на дистанции свыше 60 км.

Известно, что МР типа облако-земля предшествуют разряды типа облако-облако, которые не во всех случаях обнаруживаются системами локации гроз, основанными на приеме электромагнитного излучения. Анализ данных эксперимента, позволяет сделать вывод о высокой чувствительности датчика напряженности поля ко всем типам МР в радиусе до 50 км, что очень важно при выявлении предгрозового состояния. Вместе с тем, несколько ударов во вспышке флюксметром, в виду его малой (5 Гц) полосы пропускания, не различаются, что никоим образом не влияет на вероятность обнаружения МР.

### Выводы

Датчики напряженности электрического поля Земли позволяют уверенно идентифицировать факт МР любого типа на расстояниях до 50 км. ГПД, обладая достаточной точностью определения координат МР в зоне 20-80 км способен обеспечить прогнозирование направления движения и развития грозового фронта, но в случае формирования грозовой ячейки в непосредственной близости от объекта, неэффективен до момента обнаружения первого МР. Флюксметр устраняет данный недостаток, а влияние на структуру поля всех электрических процессов в облаке позволяет с высокой вероятностью фиксировать предгрозовое состояние. Совместное применение в однопунктовых системах ГПД и измерителя электрического поля позволит повысить вероятность обнаружения грозоопасности до первой вспышки и уменьшить погрешности определения дальности в зоне до 20 км.

### *Список литературы*

1. Кононов И. И., Петренко И. А., Снегуров В. С. Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 222 с.
2. Кононов И.И., Юсупов И.Е., Кандарацков Н.В. Анализ однопунктовых методов пассивной локации грозового разряда // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 11-12. С. 875-888
3. Vaisala Thunderstorm Local Lightning Sensor TSS928TM <http://www.vaisala.ru/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/TSS928-Datasheet-B210326EN-E-LoRes.pdf>
4. BTD-300 Thunderstorm Detector <http://www.biral.com/pcat/thunderstormlightning-detectors/>
5. Launa M. Maier Electric Field Mill Network Products to Improve Detection of the Lightning Hazard. – The Space Congress® Proceedings, 1987, p. 22-32.
6. Murphy, M.J., Holle, R.L., Demetriades, N.W.S. Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations. – 20th International Lightning Detection Conference (ILDC). Proceedings. Tucson, 2008.
7. Коровин Е.А., Ефимов В.А., Денисенков Д.А., Крисанова О.А., Рудь А.А., Чернышев С.В. Датчик напряженности электрического поля Земли // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред материалы VII Всероссийской научной конференции 2016. С. 254-259.
8. Алехин С.Г., Ефимов В.А., Полушин П.А., Готюр И.А., Жуков В.Ю., Костромитинов А.В., Кулешов Ю.В., Рудь А.А., Щукин Г.Г., Караваев Д.М., Михайловский Ю.П., Андреев-Красносельский А.А. Компенсационный электростатический флюксметр. Патент 2501029 С1 Россия МПК G01R 29/12/ Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского МО РФ, опубликовано 10.12.13 г., Бюллетень №34.
9. Network for Lightning and Thunderstorms in Real Time [http://en.blitzortung.org/live\\_lightning\\_maps.php](http://en.blitzortung.org/live_lightning_maps.php)



# ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАНЦИИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ ГНСС ФГБУ ВГИ В НАЛЬЧИКЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИНТЕГРАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ

Калинников В.В.<sup>1</sup>, Удриш В.В.<sup>2</sup>, Тертышников А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, г. Казань

<sup>2</sup>Министерство Обороны РФ, г. Москва

Водяной пар является главным парниковым газом и играет важную роль радиационном балансе атмосферы и гидрологическом цикле [1]. Параметром, характеризующим содержание водяного пара в единице объема влажного воздуха, является плотность ( $\rho$ ). Но эта величина доступна для измерения только в приземном слое, что не позволяет оценить полный влагозапас атмосферы. Для этой цели используется интегральное содержание водяного пара:

$$IWV = \int_0^{\infty} \rho \cdot dh, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность водяного пара [кг/м<sup>3</sup>],  $h$  – текущая высота интегрирования [м], а параметр  $IWV$  в единицах кг/м<sup>2</sup>.

Интегральное содержание водяного пара может быть определено с помощью технологии радиозондирования атмосферы, радиометрических систем наземного и спутникового базирования. Последние два десятилетия в качестве датчиков  $IWV$  стали активно использоваться наземные приемники сигналов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Преимуществами зондирования  $IWV$  по сигналам ГНСС являются оперативность, дешевизна, возможность получать результаты днем и ночью, всепогодность, так как системы ГНСС работают в дециметровом диапазоне радиоволн.

Для расчета  $IWV$  разработано приложение TropoGNSS [2], позволившее автоматизировать расчеты по сигналам ГНСС с временным разрешением 5 минут и точностью 0.8–1.0 кг/м<sup>2</sup>. Программа TropoGNSS прошла успешную проверку в Приволжье, а затем в экспедициях в Приэльбрусье в 2014-2015 гг. Предполагалось получить регрессионное соотношение между указанными характеристиками, что представляет интерес для оценки регионального влагозапаса атмосферы и решения задач мониторинга метеорологической безопасности [3]. Данная параметризация полезна и для калибровок данных спутниковых радиометров [4]. Регионально подобранная связь интегрального содержания и приземной плотности актуальна и для моделирования величины задержки радиосигналов ГНСС в атмосфере из-за рефракции на водяном паре [5].

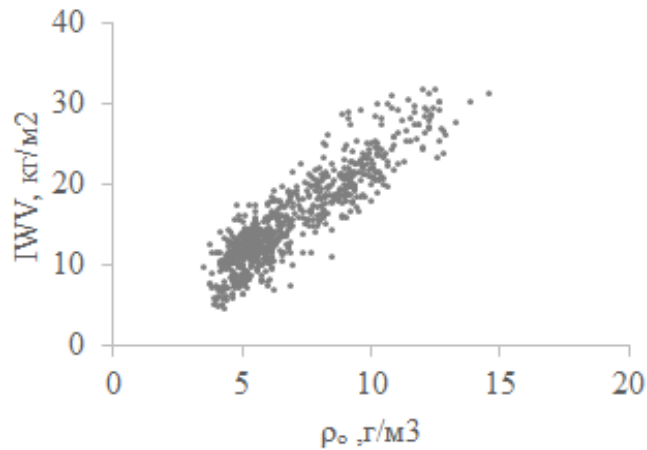


Рис. 1. Диаграмма рассеяния между оценками интегрального содержания водяного пара и измерениями его приземной плотности

По характеристикам принятых в ФГБУ ВГИ в Нальчике сигналов ГНСС за март-май 2015 г. были рассчитаны оценки влагозапаса атмосферы, которые сравнивались с доступными данным о приземной плотности водяного пара  $\rho_0$ . Для этого использовались трехчасовые данные о приземной плотности пара с метеостанции в г. Нальчик (WMO индекс 37212).

Полученная диаграмма рассеяния представлена на рис. 1.

Можно использовать два способа, чтобы найти регрессионную зависимость. Первый основан на приближенной зависимости плотности от высоты:

$$\rho \approx \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{h}{a}\right), \quad (2)$$

где  $a$  – масштаб высоты, равный, обычно, 1.5 – 2.5 км.

Подставляя выражение (2) в (1) получим:

$$IWV = a \cdot \rho_0 \quad (3).$$

Второй способ – это подбор коэффициентов, например, линейной зависимости:

$$IWV = a \cdot \rho_0 + b \quad (4)$$

В табл.1 представлены обобщенные результаты поиска связующих уравнений, а также сравнение с результатами, полученными в работах других авторов.

**Регрессионные модели связи интегрального содержания водяного пара  $IWV$  [ $\text{кг}/\text{м}^2$ ] и приземной плотности водяного пара  $\rho_0$  [ $\text{г}/\text{м}^3$ ]; СКО – среднеквадратическая ошибка**

Модель	Пункт	Параметризация	СКО, $\text{кг}/\text{м}^2$
Elgered et al., 1982	Онсала, Швеция	$IWV = 2.021 \cdot \rho_0 + 0.95$	2.6
Tuchband and Rozsa, 2012	Будапешт, Венгрия	$IWV = 2.39 \cdot \rho_0 - 0.14$	3.3
Способ 1	Нальчик, РФ	$IWV = 2.251 \cdot \rho_0$	2.5
Способ 2	Нальчик, РФ	$IWV = 2.326 \cdot \rho_0 - 0.47$	2.6

Хорошо видно, что первый численный коэффициент имеет величину, характерную для масштаба высоты водяного пара, второй же сильно варьируется. Дальнейшие исследования позволят получить сезонные зависимости этих коэффициентов для Нальчика и других пунктов Приэльбрусья с учетом их высоты над уровнем моря.

Одним из направлений исследований климата Нальчика по сигналам ГНСС является изучение суточных вариаций интегрального влагосодержания. Осреднённый суточный ход  $IWV$  за март-май 2015 г. над Нальчиком представлен на рис. 2.

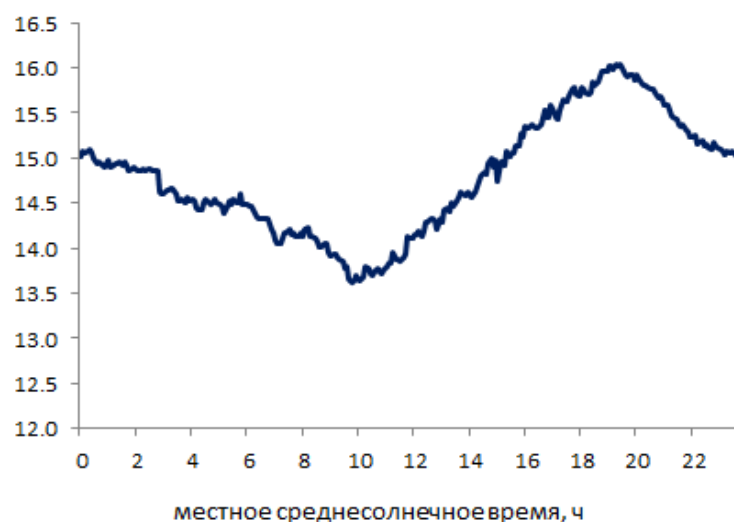


Рис. 2. Осреднённый суточный ход  $IWV$  за март-май 2015 г. над Нальчиком

Суточная амплитуда интегрального содержания составляет 1.2 мм, при этом максимум приходится на 19.3 ч местного среднесолнечного времени, тогда как минимум на 9.8 ч. Среднемесячные значения  $IWV$  над Нальчиком составили 10.8 мм в марте, 12.7 мм в апреле и 20.8 мм в мае, поэтому суточная амплитуда составляет порядка 7% от  $IWV$ .

Суточный ход приземной плотности водяного пара не повторяет ход IWV. Суточный ход масштаба высоты водяного пара имеет хорошо выраженный двугорбый характер. Первый максимум масштаба высоты составляет 2.20 км и приходится на 2.7 ч, затем масштаб высоты снижается до 1.97 км в 9.8 ч и далее вновь растет до 2.22 км в 17.8 ч. Второй минимум приходится на 22.2 ч и выражен слабо со значением масштаба высоты 2.12 км. Причины такого характера суточного хода объясняются локальной конвекцией водяного пара. Можно также отметить соответствие между максимумами IWV и режимом осадков на метеостанции Нальчик (рис. 3).

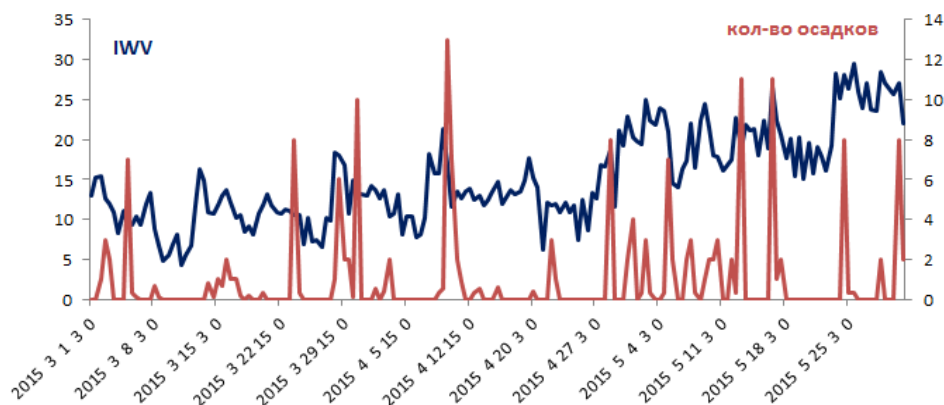


Рис. 3. Изменение IWV и количество осадков над Нальчиком в мм с временным шагом 12 ч.

Резкие всплески интегрального IWV обычно соответствуют прохождению атмосферных фронтов и ливневым осадкам.

Таким образом, в ФГБУ ВГИ в Нальчике имеется новый инструмент для мониторинга интегрального содержания водяного пара в атмосфере на основе станции приема сигналов ГНСС. Его использование позволит повысить эффективность принятия решений о проведении работ по модификации облаков, использованию ресурсов противолавинных служб и для мониторинга метеорологической безопасности Кабардино-Балкарии.

### **Список литературы**

1. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1965, 875 с.
2. Калинин В.В., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Влияние неоднородности поля атмосферного водяного пара на фазовые измерения радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем// Известия Вузов. Радиофизика, 2013, №2, с. 96-103.
3. Madhrabi A., Al Dajani H.M. Estimation of precipitable water vapour using vapour pressure and air temperature in an arid region in central Saudi Arabia// Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences, 2013, №14, pp. 1-8.

4. Elgered G., Ronnang B.O., Askne J.I.H. Measurements of atmospheric water vapor with microwave radiometry// Radio Science, 1982, Vol.17, №5, pp. 1258-1264.
5. Tuchband T., Rozsa S. Modelling Tropospheric Zenith Delays Using Regression Models Based on Surface Meteorology Data. In: Geodesy for Planet Earth. International Association of Geodesy Symposia, 2012, Vol. 136, pp. 789-794.

## **ТУШЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ВЫЗЫВАНИЯ ОСАДКОВ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

**Данелян Б.Г.<sup>1</sup>, Ковалев Н.А.<sup>2</sup>, Сажин И.В.<sup>2</sup>, Сементин В.Л.<sup>2</sup>, Столпиченко О.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУ «ЦАО», г. Долгопрудный, Московская область

<sup>2</sup>ФБУ «Авиалесоохрана», г. Пушкино, Московская область

### **Введение**

Основными причинами возникновения лесных пожаров являются засуха и нарушение правил пожарной безопасности в лесу и на прилегающих территориях.

Тушение лесных пожаров является сложным и весьма трудоемким процессом, требующим привлечения значительных финансовых и людских ресурсов. Ведущую роль в процессе тушения лесных пожаров в нашей стране играют подразделения ФБУ «Авиационная охрана лесов».

Особую роль в снижении класса пожарной опасности в лесных районах играют атмосферные осадки. В этой связи работы по искусственному увеличению атмосферных осадков в районах с высокой пожарной опасностью могут в значительной степени способствовать тушению лесных пожаров.

ФГУ «Центральная база авиационной охраны лесов «Авиалесоохрана» с 1968 до 2007 годов проводила работы по искусственному вызыванию осадков (ИВО) для тушения лесных пожаров (с 2012 года ФБУ «Авиалесоохрана»).

Например, в 2006 году было проведено 138 воздействий на 42 лесных пожара, осадки были вызваны и оказали положительное воздействие на 30 пожаров на площади около 45 тыс.

га. В связи с введением нового Лесного кодекса и передачей в 2007 году полномочий по авиационной охране лесов от пожаров уполномоченным органам государственной власти субъектов Российской Федерации, образованные в них государственные учреждения авиалесоохраны потеряли право самостоятельно выполнять работы по ИВО до получения соответствующих лицензий. Заявок на выполнение ИВО, по финансовым соображениям, в ФГУ «Авиалесоохрана» с 2007 года от специализированных учреждений по авиационной охране лесов от пожаров не поступало.

В настоящее время, в соответствии с изменениями внесенными в Лесной кодекс (Федеральный закон от 23.06.2016 N 218-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования регулирования лесных отношений» (ст. 81, п. 37.1)), на ФБУ «Авиалесоохрана» в рамках государственного задания возложено осуществление мероприятий по искусственному вызыванию осадков в целях тушения лесных пожаров.

Таким образом, одним из основных направлений деятельности у ФБУ «Авиалесоохрана» с 2017 года становится проведение работ по тушению лесных пожаров и снижению пожарной опасности в прилегающих районах искусственно вызванными осадками с применением разработанных и планируемых к разработке реагентов и технологий проведения работ, запатентованных в Российской Федерации.

Работы по ИВО проводились в июле–августе 2017 года в Иркутской области, Республике Бурятия, Забайкальском крае и Республике Саха (Якутия) с применением самолета Ан-26 «Циклон» авиакомпании «ИрАэро», оснащенного специализированным оборудованием для активных воздействий АСО-2И, позволяющего нести 384 пиротехнических изделия ПВ-26М.

Технические средства воздействия системы «Веер» с АСО-2И были предоставлены компании «ИрАэро» АНО «АТТЕХ», научно-методическое сопровождение работ по ИВО осуществляло ФГБУ «ЦАО». Предварительные результаты этих работ обсуждаются ниже.

### **Предварительные результаты работ**

Воздействия были проведены 5 июля (Республика Бурятия), 6 июля (Иркутская область), 7–9 июля (Забайкальский край), 12 июля (Иркутская область и Республика Бурятия), 24 и 27 июля (Республика Саха Якутия), 28 и 30 июля (Иркутская область), 31 июля (Иркутская область и Республика Бурятия), 01 августа (Иркутская область). В таблице 1 представлены сводные данные по проведенным воздействиям.

## Сводные данные по проведенным воздействиям

Дата	Субъект РФ	№ пожара	Время воздействия (местное)	Количество пиропатронов (шт)	Налет СМЛ (час:мин)
5.07.17	Республика Бурятия	к-917, к-914	14.26	23	4ч 20мин
6.07.17	Иркутская область	к -1281 к -1460	13.40	20	3ч 05мин
7.07.17	Забайкальский край	к -2157 к -2161	13.24	60	5ч 10мин
8.07.17	Забайкальский край	к -2220	16.20	56	6ч 30мин
		к -2141, угроза населенному пункту Тупик	16.58	144	
		к-2252	17.50	36	
9.07.17	Забайкальский край	к-2141	14.09	42	6ч 15мин
		к-2220; ЛПП-№23	13.39	56	
12.07.17	Иркутская область	к-1531 к-1561	15.21	90	4ч 00мин
	Республика Бурятия	к-966	16.46	60	
24.07.17	Республика Саха (Якутия)	к-569	19.34	69	6ч 15мин
27.07.17	Республика Саха (Якутия)	к-569	09.28	37	4ч 35мин
		к -1652	15.40	33	1ч 35мин
		к -1684, к-1656	16.10	34	
28.07.17	Иркутская область	к-1698, к-1691	13.09	68	2ч 15 мин
		к-1694	13.44	40	
		к-1710, к-1708	14.08	42	
30.07.17	Иркутская область	к-1698, к-1691, №31	14.26	23	3ч 30мин
		№ 25, к-1721	15.32	8	
31.07.17	Иркутская область	ЛПП № 25,23,18 к-1721	15.46	42	5ч 05мин
	Республика Бурятия	ЛПП №13	17.56	16	
01.08.17	Иркутская область	ЛПП № 25,24,22	16.25	31	4ч 25мин
		ЛПП № 60	18:00	12	
0.3.08.17	Иркутская область	ЛПП №22	17:06	30	4ч 25мин

В качестве примера разберем два наиболее показательных воздействия, проведенных в Забайкальском крае 8 июля 2017 г. и Республике Саха (Якутия) 24 июля 2017 г. Для этих случаев получены максимально доступные данные по осадкам, измеренные на ближайших к пожарам станциях, и подтвержденные наземными лесопожарными подразделениями региональных служб лесного хозяйства.

**8 июля 2017 г.****Метеорологические условия в районе воздействий 8 июля 2017 г.**

В восточной части Забайкальского края в районе пожара к-2141 погодные условия утром 8 июля определялись передней частью окклюдированного циклона, по прогнозу осадков 6-и моделей ожидалось слабые дожди, прогнозируемая сумма осадков за день на основе данных 6-и моделей прогноза погоды составила 3 мм. Наблюдалось развитие облачности в

условиях юго-восточных потоков у земли и южных потоков на восточной периферии окклюзиванного циклона.

По данным радиозондирования в г. Чита в 00 UTC атмосфера была стратифицирована неустойчиво, по всем высотам отмечались небольшие дефициты точки росы, способствующие развитию перспективной облачности. Нулевая изотерма располагалась на высоте 3400 м. тропопауза находилась на высоте 11300 м. По восточной периферии циклона происходил интенсивный вынос континентального тёплого воздуха с территории Монголии, по западной периферии – более холодный воздух арктического происхождения, в условиях фронта окклюзии развивались скрытые конвективные ячейки – в системе фронта наблюдались как слоисто-кучевые, так и кучевые и кучево-дождевые облака, которые являлись объектами воздействий.

### Проведение воздействий

Основной задачей 8 июля 2017 г. было проведение воздействий с целью увеличения осадков в Забайкальском крае в районе пожара к-2141, развивающегося вблизи населенного пункта Турик Магочинского района. Возникла угроза населенному пункту. В этой связи особое внимание было уделено именно этому пожару. На подлете к пожару к-2141 и отлете от него были проведены воздействия в районе пожаров к-2220 и к-2252. На рисунке 1 приведена траектория полета с воздействиями в районе пожара к-2141. Засев проводился в вершины мощно-кучевых облаков, которая менялась от 5700 до 6200м.



Рис.1. Траектория полета самолета Ан-26 «Циклон» с воздействиями 8 июля 2017 г. (пожар к-2141 в районе поселка Турик).





## **24 июля 2017 г.**

### **Метеорологические условия в районе воздействий 24 июля 2017 г.**

24 июля 2017 г. центральная часть Якутии и вилуйская группа районов находилась в тыловой части циклона с центром над Хабаровским краем. По прогнозу на 24 июля на 03-06 UTC ожидалось незначительные осадки на вторичном холодном фронте – ожидаемая сумма осадков, рассчитанная при осреднении выходных данных 5 моделей численного прогноза погоды в районе п. Бердигестях, составляла 2,5 мм. Максимальные суммы осадков в радиусе 200 км от посёлка – в районе работ могли составить до 9 мм по прогнозу. Вероятность возникновения гроз – слабая, максимальные значения индексов конвективной неустойчивости наблюдались к югу от р. Лена, а наиболее сильные грозы на вторичных холодных фронтах ожидалось в районе г. Алдан.

По данным радиозондирования в г. Вилуйск в 00 UTC атмосфера была стратифицирована неустойчиво в свободной атмосфере. У поверхности земли наблюдалась приземная инверсия, возникшая в ночное время за счёт радиационного выхолаживания. Выше 500 м воздух был стратифицирован неустойчиво, по оценке профиля температуры воздуха и температуры точки росы уровень конденсации находился на высоте 2000 м, а значит и нижняя граница кучевой облачности. Развитие облачности наблюдалось до высоты 5300 м. Отрицательные температуры в облаке наблюдались выше 3500 м. Тропопауза находилась на высоте 11300 м, Развитие конвективной облачности в тыловой части циклона усиливалось в условиях адвекции арктического холодного воздуха за счёт дополнительной неустойчивости.

### **Проведение воздействий**

Воздействие проводилось на гряде кучевых и мощно-кучевых облаков, расположенных на удалении от 10 до 35 км от пожаров (рис. 4). Засеивались облака с верхней границей от 5200 до 5500 м. Температура на верхней границе составляла  $-12^{\circ}\text{C} \div -15^{\circ}\text{C}$ . Было израсходовано 106 пиропатронов ПВ-26М. На ближайшей к пожарам станции Бердигестях, отмечались значительные осадки (рис. 5).



- 4) Модель Национального центра по прогнозу – GFS (Global Forecast System);  
 5) Модель Канадского метеоцентра GEM (Global Environmental Multiscale Model);  
 6) Модель Японского метеорологического агентства JMA.

Прогностические данные по осадкам брались по нескольким точкам в радиусе 50 км от конкретного пожара для каждой из моделей. Полученные осреднением по выбранной площади, прогностические данные по этим моделям сравнивались с фактически выпавшими осадками на ближайшей к пожарам метеостанции. Результаты оценок приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Эффективность работ по искусственному вызыванию осадков**

Дата	№ пожара	Качественная оценка	Прогноз осадков (мм)	Фактические осадки (мм)	Эффект (%)
5.07.17	к-917, к-914	Осадки в районе пожара к-917	4,0	10,5	162,5
6.07.17	к -1281, к -1460	Осадки в районе пожара. Ликвидирован	4,7	18,0	282,9
7.07.17	к -2157, к -2161	Осадки в районе пожаров	11,7	19,6	67,5
8.07.17	к -2220		4,3	4,8	11,6
	к -2141,	Через 60 мин над пожаром выпали ливневые осадки	0,6	2,0	230,0
	к-2252	Над пожаром осадки	5,5	7,0	27,2
9.07.17	к-2141	Над пожаром ливневые осадки	9,7	18,8	93,8
	к-2220; ЛП-№23	Над пожаром ливневые осадки	10,7	17,3	61,7
12.07.17	к-1531, к-1561	Над пожаром интенсивные осадки	1,5	4,5	200,0
	к-966	Над пожаром полосы падения	0,8	0,0	-
24.07.17	к-569	Над пожаром ливневые осадки	3,8	11,0	189,5
27.07.17	к-569	Над пожаром ливневые осадки	2,4	12,0	400,0
	к -1652, к -1684, к-1656	Над пожаром ливневые осадки Пожары ликвидированы	0,7	1,0	42,9
28.07.17	к-1698, к-1691, к-1694 к-1710, к-1708	Выпавшие осадки способствовали ликвидации пожаров	2,1	9,0	328,6
30.07.17	к-1698, к-1691, №31, № 25, к-1721	Осадки в районе пожаров, горение приостановлено	3,8	15,0	294,7
31.07.17	ЛП № 25,23,18 к-1721	Над пожаром умеренный ливень Горение приостановлено	2,2	3,4	54,5
	ЛП №13	Над пожаром умеренный ливень Пожар локализован	3,1	6,0	93,5
01.08.17	ЛП № 25,24,22,60	Слабые осадки. Горение приостановлено	4,0	5,0	25,0
0.3.08.17	ЛП №22 (к-1728)	Осадки слабые, незначительные	1,4	1,6	14,3

### **Заключение**

После значительного перерыва в нашей стране возобновились работы по искусственному вызыванию осадков для тушения лесных пожаров. Для возобновления работ проделана огромная работа. Были подготовлены специалисты ФБУ «Авиалесоохрана» и получена лицензия Росгидромета на проведение работ. Подготовлены и согласованы с региональными департаментами по гидрометеорологии программы работ. Получены разрешения на проведения работ по искусственному увеличению осадков.

АО «ФНПЦ НИИ прикладной химии» разработало новые пиротехнические изделия ПВ-26М с пониженным классом опасности. Оборудован техническими средствами воздействия самолет Ан-26 «Циклон».

В июле-августе выполнен этап производственных работ по искусственному увеличению осадков с целью снижения класса пожарной опасности и тушения лесных пожаров. Работы проведены в Республике Бурятия, Иркутской области, Забайкальском крае и Республике Саха (Якутия). Проведена предварительная оценка эффекта увеличения осадков. В большинстве случаев воздействия привели к усилению осадков. Крайне редкая осадкомерная сеть в районах возгораний, а в большинстве случаев отсутствие станций вблизи пожаров, значительно затрудняет проведение оценки количества дополнительных осадков. Необходима разработка новых методов оценки в условиях редкой осадкомерной сети. В целом работы можно считать успешными, проведение которых весьма целесообразно.

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ОДНОЯЧЕЙКОВЫХ ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ**

**Аппаева Ж.Ю., Березинский И. Н., Инюхин В.С., Чередник Е.А.**

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Одноячейковые процессы Северного Кавказа наблюдаются в 10-15 % всех случаев образования градовых процессов. Несмотря на относительную редкость их появления, они представляют большой научный интерес. Это связано со специфическими условиями их образования, не характерными для других типов градовых процессов. Одноячейковые градовые облака, как правило, возникают беспорядочно в условиях внутримассового развития. Они, как правило, осесимметричны, малоподвижны или перемещаются подчиняясь орографии. Развиваются в дни со слабым ветром и с малыми вертикальными его сдвигами в малоградиентных полях пониженного и повышенного давления. Сопровождаются выпадением слабого града, град выпадает в виде отдельных пятен [1-4].

*Целью настоящей работы являлось построение физико-статистической модели одноячейковых градовых облаков, включающей распределения аэросиноптических данных для дней с*

градом и радиолокационных параметров облаков, наблюдаемых на территории Северного Кавказа за 2011-2016 года.

Работа проводилась на научно-исследовательском полигоне Высокогорного геофизического института в рамках темы «Исследование макро- и микроструктурных характеристик градовых облаков на основе радиолокационных, спутниковых, грозопеленгационных, наземных и аэросиноптических данных».

В процессе работы осуществлялась паспортизация градовых облаков и осадков и сопутствующей синоптической обстановки. Полученная информация заносилась в соответствующие таблицы базы данных (БД) [5]. Для этого была создана SQL-база данных под управлением СУБД «Postgresql», установленная на сервере ОАВ ВГИ, клиентской частью которой является СУБД Microsoft Access. В настоящей работе были обработаны данные наблюдений за 6 лет (2011-2016 гг.).

Важным моментом в изучении особенностей развития конвективных облаков являются исследования синоптических характеристик, приводящих к развитию градовых облаков. К таким характеристикам можно отнести направление и скорость ведущего потока, температуру и влажность воздуха, а также общую энергию неустойчивости атмосферы, которая проявляется в величине скорости восходящих потоков. На рис. 1 представлены повторяемость направлений ведущего потока в дни развития одноячейковых градовых облаков за 2011-2016 годы. Из данных, приведенных на рис.1 видно, что ведущие потоки западного, юго-западного и северо-западного направления в сумме составляют 53%, а северо-восточного и юго-восточного направления в сумме составляют 31%. Остальные 16% всех потоков имели южное направление.

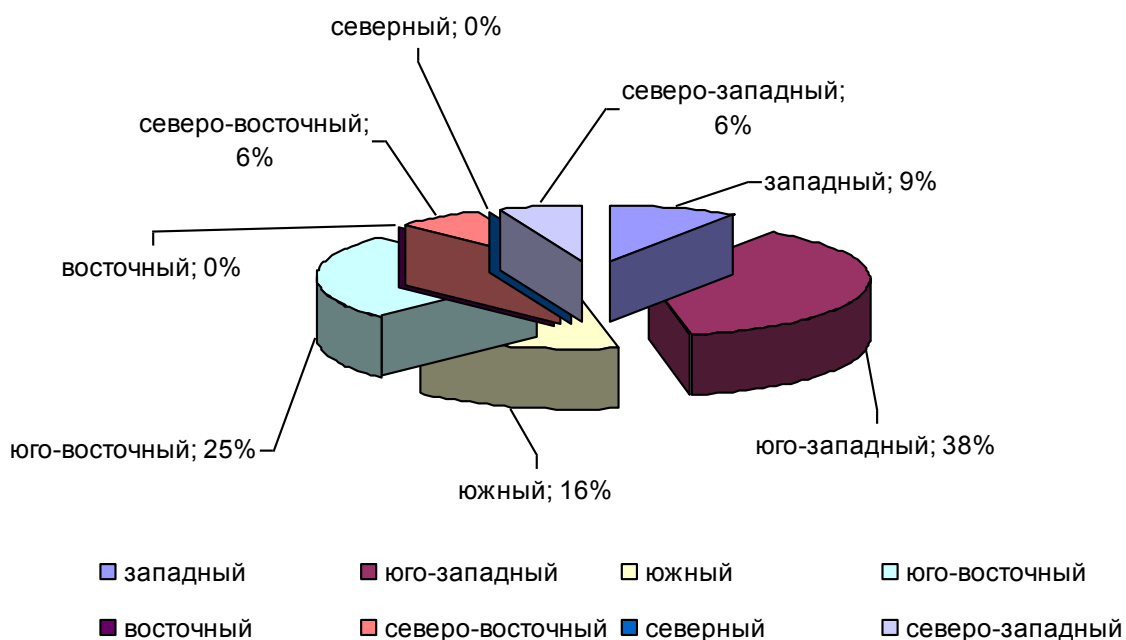


Рис.1. Повторяемость направлений ведущего потока в дни развития одноячейковых градовых облаков.

На рис. 2 представлены повторяемость скорости ведущего потока в дни развития одноячейковых градовых облаков. Из анализа данных рис.2 видно, что в 66% случаев скорость ведущего потока не превышает 48 км/ч. При этом средняя скорость составляет 32 км/ч со стандартным отклонением 16,0, минимальная – 4 км/ч, максимальная – 60 км/ч.

На рис.3 представлено распределение скоростей восходящих потоков в период развития одноячейковых градовых облаков. Анализ результатов показал, что скорость восходящих потоков в 78% случаев меньше 21 м/с. При этом среднее значение скорости – 19 м/с со стандартным отклонением 5,6 м/с.

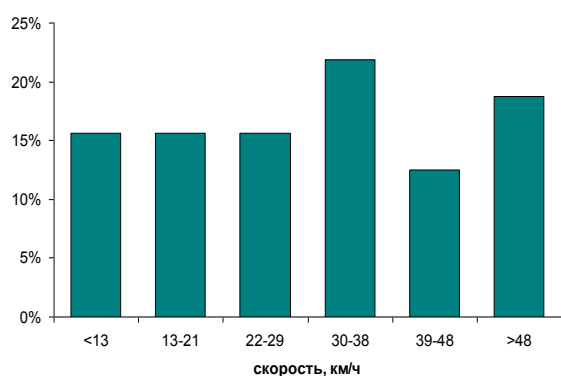


Рис.2. Распределение скоростей ведущего потока для одноячейковых градовых облаков.

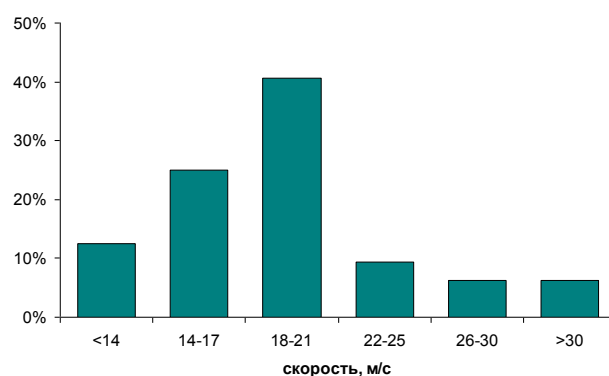


Рис.3. Распределение скоростей восходящих потоков в период развития одноячейковых градовых облаков.

На рис. 4 представлена диаграмма повторяемости дневной температуры воздуха в дни развития одноячейковых градовых облаков. Из анализа рис. 4 следует, что среднее значение дневной температуры воздуха в дни развития градовых ячеек составило 26,9 °C при стандартном отклонении 4,0. При этом минимальная температура, зафиксированная за шесть лет наблюдений, составляла 15,5 °C, а максимальная – 32,5 °C.

Анализ рис.5 показал, что минимальное значение влажности воздуха, зафиксированное в процессе наблюдений, составило 34%, максимальное – 92%. Среднее значение влажности воздуха в рассматриваемые дни составило 64% при стандартном отклонении 14,2. Так же следует отметить, что в дни развития одноячейковых градовых облаков влажность в основном (75% случаев) находилась в пределах 50-80%.

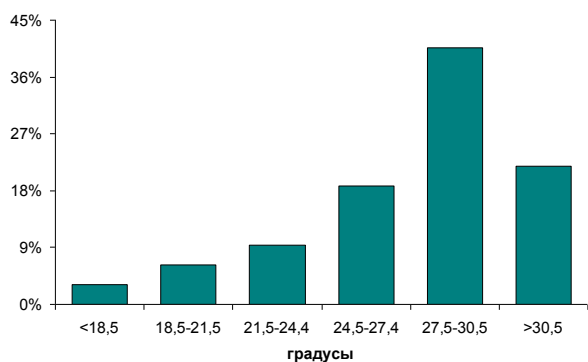


Рис. 4. Повторяемость дневной температуры воздуха в дни развития одноячейковых градовых облаков

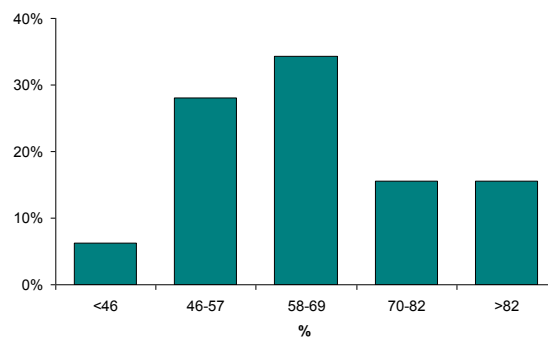


Рис. 5. Распределение влажности воздуха в дни развития одноячейковых градовых облаков.

В результате радиолокационных наблюдений был накоплен обширный материал, на основании которого были выявлены некоторые глобальные характеристики движения и развития одноячейковых градовых облаков в регионе.

На рис.6 представлена схема расположения мест зарождения одноячейковых градовых облаков на территории Кабардино-Балкарской республики.

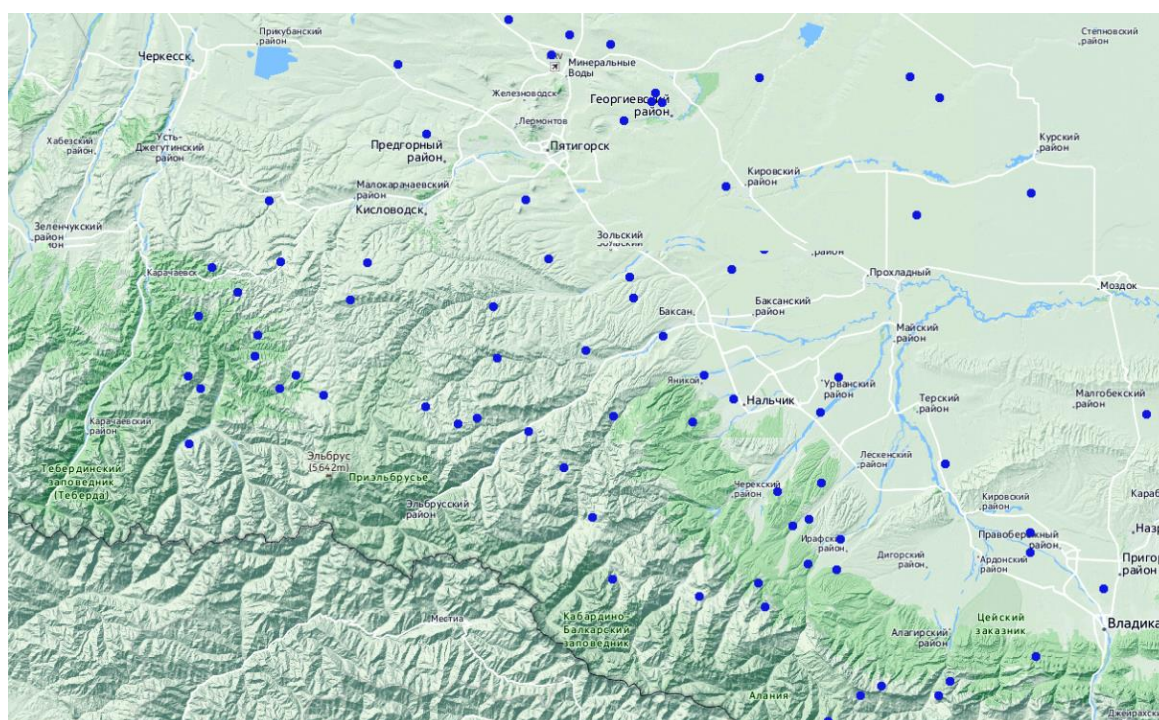


Рис. 6. Схема расположения мест зарождения одноячейковых градовых облаков на фоне карты КБР.

Из рисунка видно, что места зарождения облаков расположены более-менее равномерно по территории наблюдения.



В таблице 1 собраны статистические данные об основных синоптических характеристиках в дни с развитием одноячейковых градовых облаков.

Таблица 1

**Синоптические характеристики в дни зарождения одноячейковых градовых облаков на территории КБР за период 2011 – 2016 гг.**

	<i>min</i>	<i>max</i>	среднее значение	стандартное отклонение	интервал значений	Вероятность попадания в интервал
Скорость ведущего потока, км/ч	4	60	32	16	13-48	66%
Скорость восходящего потока, м/с	10	36	19	5,6	10-21	78%
Температура воздуха, °C	15,5	32,5	9,8	6,7	24-33	81%
Влажность %	34	92	45	14,2	46-82	78%

На рис.7 показаны распределения направлений перемещения одноячейковых градовых облаков. Данные на рисунке показывают практически равновероятностное распределение направлений перемещения градовых ячеек, что характерно для одноячейковых процессов.

Максимум приходится на юго-западное направление со средним значением 185 градусов, стандартным отклонением 94,7.

Из анализа данных рис.8 видно, что распределение расстояний перемещения одноячейковых градовых облаков может быть описано одномодальным законом. В 86% случаев за время своего существования ячейки проходят расстояние менее 15,5 км и в 95% случаев ячейки проходят расстояние не более 20 км. При этом среднее пройденное расстояние – 9,8 км со стандартным отклонением 6,7 км, минимальное – 2,3 км, максимальное – 36,2 км.

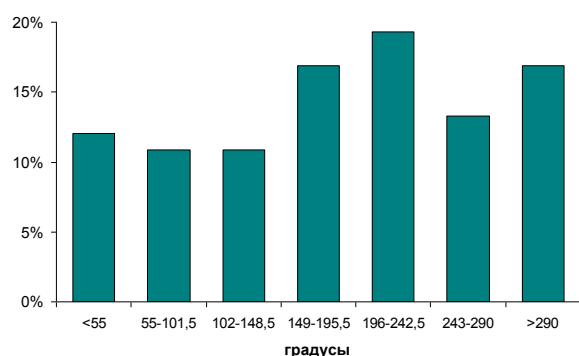


Рис. 7. Распределение направления перемещения одноячейковых градовых облаков.

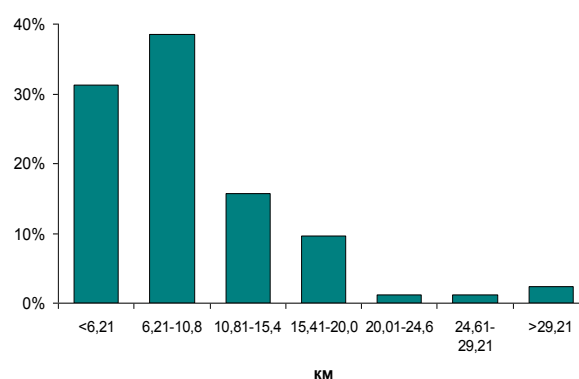


Рис. 8. Распределение перемещений одноячейковых градовых облаков.

Из данных, приведенных на рис. 9, видно, что повторяемость скоростей перемещения одноячейковых градовых облаков, так же описывается одномодальным законом распределения. Из рисунка видно, что в 84% случаев скорость ячеек не превышает 18 км/ч. При этом среднее

значение скорости – 12,1 км/ч со стандартным отклонением 6,5 км/ч, а минимальная и максимальная скорости перемещения одноячейковых градовых облаков составляли 2,1 и 34,5 км/ч соответственно.

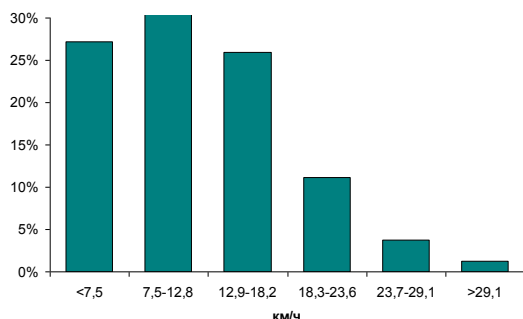


Рис. 9. Распределение скоростей перемещения одноячейковых градовых облаков.

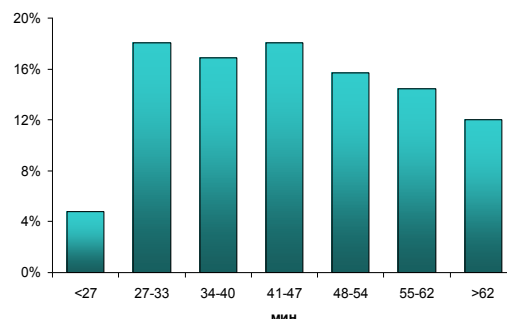


Рис.10. Время жизни одноячейковых градовых облаков.

Среднее значение времени жизни (рис.10) для рассмотренных градовых ячеек составило 45 минут при стандартном отклонении 12 мин. При этом минимальное время жизни составило 20 мин, максимальное – 69 мин.

Наряду с динамическими характеристиками перемещения градовых ячеек большой интерес представляют энергетические параметры развития градовых ячеек. Ниже представлены гистограммы повторяемости некоторых из этих параметров, полученных в период максимального развития ячеек за 2011-2016 годы.

Анализ рис.11 показывает, что минимальное значение времени достижения ячейки градового состояния составило 7 минут, максимальное – 39 минут. Среднее значение времени достижения рассмотренными ячейками градового состояния составило 17 минут при стандартном отклонении 7 мин.

Анализируя рис.12, видно, что в 83% случаев верхняя граница градовых ячеек в период их максимального развития расположена на высотах 7-11,4 км, а ячейки с высотой верхней границы больше 10 км составляют 54%. Минимальная высота верхней границы градовой ячейки составила 4,8 км, максимальная – 12,8 км. Среднее значение высоты верхней границы для рассмотренных градовых ячеек составило 9,1 км при стандартном отклонении 1,7.

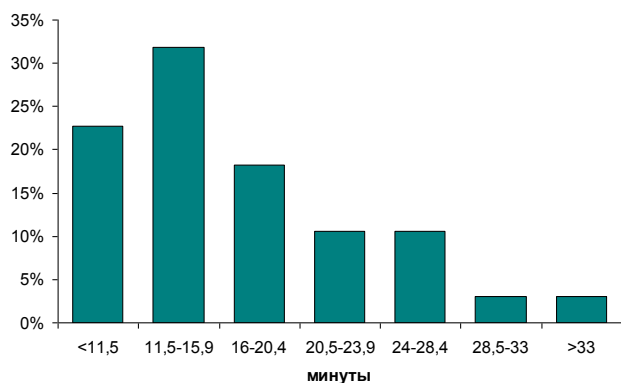


Рис. 11. Повторяемость времени достижения ячейкой градового состояния

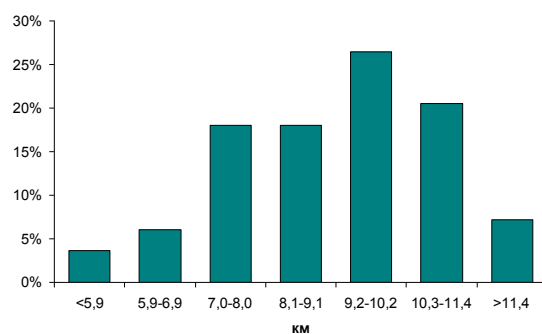


Рис. 12. Повторяемость высоты верхней границы одноячейковых градовых облаков в период максимального развития.

Анализ рис. 13 показывает, что в 92 % случаев площадь выпадения градовых осадков из отдельных градовых ячеек в период их максимального развития не превышает  $34 \text{ км}^2$ . Среднее значение площади выпадения града для рассмотренных градовых ячеек составило  $9,9 \text{ км}^2$  при стандартном отклонении  $14,6 \text{ км}^2$ .

Как следует из анализа данных (рис.14), в 86% случаев максимальная отражаемость  $Z_{10}$  отдельных градовых ячеек в период их максимального развития не превосходит  $61 \text{ dBZ}$ . Минимальная отражаемость составляла  $47 \text{ dBZ}$ , максимальная –  $68 \text{ dBZ}$ . Среднее значение отражаемости для рассмотренных градовых ячеек в период их максимального развития составило  $57 \text{ dBZ}$  при стандартном отклонении  $3,5 \text{ dBZ}$ .

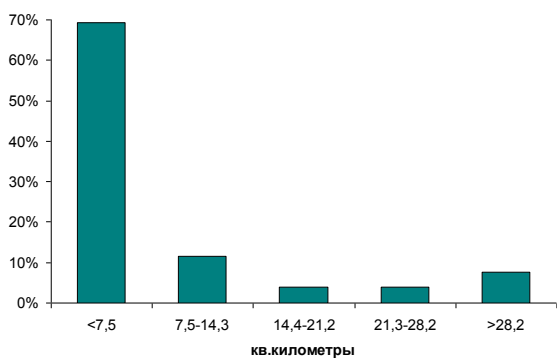


Рис. 13. Повторяемость площади выпадения градовых осадков (град с дождем) в период максимального развития ячеек.

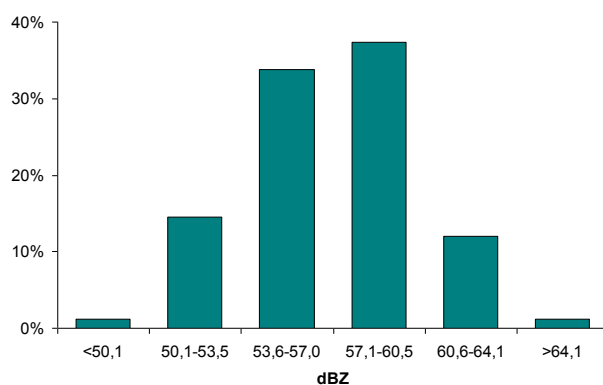


Рис. 14. Повторяемость максимальной радиолокационной отражаемости  $Z_{10}$  в период максимального развития градовых ячеек.

В таблице 2 представлены статистические параметры одноячейковых градовых облаков, полученные по радиолокационным данным.

**Статистические параметры одноячейковых градовых облаков, полученные по радиолокационным данным**

	Среднее значение	Стандартное отклонение	Интервал значений	Вероятность попадания в интервал
Скорость перемещения ячейки	12,1 км/ч	6,5	2-18 км/час	84%
Направление перемещения ячейки	185 град	94,7	149-360 град.	66%
Расстояние перемещения	9,8 км	6,7	3-15 км	86%
Время жизни градовой ячейки	45 мин	12,3	0,5-1 час	83%
Время достижения градового состояния	17 мин	7	7-28 мин	94%
Высота верхней границы градовой ячейки в период ее максимального развития	9,1 км	1,7	7,0-11,4 км	83%
Площадь выпадения града	9,9 км <sup>2</sup>	14,6	1-34 км <sup>2</sup>	92%

### **Выводы**

В настоящей работе дальнейшее развитие получила тема разработки эмпирической модели конвективных облаков различных типов, наблюдаемых на Северном Кавказе [1, 6-9].

Был собран обширный материал по динамическим, временным и энергетическим параметрам градовых облаков различных типов и осадков из них. На его основании была построена физико-статистическая модель одноячейковых градовых облаков. В ней представлены распределения синоптических характеристик для дней с градом, а так же распределения основных радиолокационных параметров облаков. Полученные в работе результаты отражают характер природной изменчивости в формировании и развитии отдельных градовых ячеек, определяют области вариации их основных характеристик. Полученные закономерности могут быть использованы в оперативной работе по засеву градовых облаков, при разработке методов сверхсрочного прогноза градовой активности, а также при сопоставительном анализе результатов численного моделирования градовых облаков с данными экспериментальных исследований.

### **Список литературы**

1. Абшаев М.Т. Структура и динамика развития грозо-градовых процессов Северного Кавказа. Труды ВГИ. 1984 Вып. 53. С. 6 – 22.
2. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. М.: - Гидрометеиздат. 1991. – 424 с.

3. Marwitz J.D. The structure and motion of severe hailstorms. Parts I-III. - J. Apl. Met. V. 11 1972. – P. 166 – 201.
4. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч.2. Вып.1. 1987. 297с.
5. Инюхин В.С. База радиолокационных данных // Труды ВГИ. 2014. Вып. 99. С. 52-60.
6. Инюхин В.С., Малкаров А.С., Чередник Е.А. Динамические характеристики градовых процессов // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик: ООО «Печатный двор». 2013. С. 199-207.
7. Инюхин В.С., Куцев С.А., Макитов В.С., Чередник Е.А. Динамические характеристики отдельных градовых ячеек центральной части Северного Кавказа по данным радиолокационных наблюдений // Труды ВГИ. 2014. Вып. 99. С. 41-51.
8. Абшаев М.Т. и др. Некоторые результаты радиолокационных исследований структуры и динамики развития грозо-градовых процессов Северного Кавказа. Труды ВГИ. 1976. Вып. 33. С. 81-91.
9. Салуквадзе Т.Г., Хелая Э.И., Балавадзе А.Ш., Киладзе Р.И. Эмпирическая радиолокационная модель суперячейкового конвективного облака. // Труды Института геофизики им. И. Нодия. 2008. Т. LX. С.242-246.

## **НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ОБЛАКА СОЛЕВЫМ ПОРОШКОМ**

**Дрофа А.С.<sup>1</sup>, Иванов В.Н.<sup>1</sup>, Данелян Б.Г.<sup>2</sup>,  
Колосков Б.П.<sup>3</sup>, Корнеев В.П.<sup>3</sup>, Бычков А.А.<sup>3</sup>, Частухин А.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ФГБУ НПО «Тайфун», г. Обнинск

<sup>2</sup> ФГБУ «ЦАО», г. Долгопрудный

<sup>3</sup> АНО «Агентство АТТЕХ», г. Москва

Для получения дополнительных осадков из облаков используются методы активных воздействий на облака с применением различных гигроскопических реагентов (Сталевич, 1972; Mather et al, 1997; Bruintjes, 1999; Silverman and Sukarnjanasat, 2000; Woodley and Rosenfield, 2004). В НПО «Тайфун» разработан гигроскопический реагент в виде полидисперсного

солевого порошка (Дрофа и др., 2013). Реагент изготовлен по специальной технологии из порошка NaCl в смеси с аэросилом, используемым как антислеживающая добавка. Аэросил – тонкодисперсный порошок из твердых частиц SiO<sub>2</sub>. Частицы аэросила не обладают гигроскопическими свойствами и при воздействии на облачную среду вместе с соевыми частицами влияние их на процессы облакообразования не проявляется. Эффективный радиус частиц солевого порошка составляет  $r_3=5,3$  мкм, относительная ширина спектра размеров –  $\sigma =1,0$ . В порошке не наблюдаются частицы с размерами более 15 мкм.

Результаты лабораторных экспериментов (Drofa et al, 2010; Дрофа и др., 2013) и численного моделирования (Дрофа, 2010; Беляева и др., 2013) показали значительные преимущества использования разработанного солевого порошка по сравнению с другими известными гигроскопическими реагентами. Данный порошок отличается от всех ранее использовавшихся гигроскопических реагентов оптимальной микроструктурой гигроскопических частиц для трансформации спектра облачных капель с целью интенсификации процессов коагуляции и последующего осадкообразования в конвективных облаках.

Натурные испытания эффективности воздействия на облака соевым порошком проводились в период выполнения работ по улучшению погодных условий в Москве 11 сентября 2016 г. специалистами АНО «Агентство АТТЕХ» и ФГБУ «ЦАО». В этот день метеорологические условия в Москве и области определялись влиянием холодного малоподвижного атмосферного фронта, характеризовавшегося плотной многослойной слоистой и слоисто-дождевой облачностью (Ns) с внедренными конвективными ячейками высотой до 4–5 км. Перемещение облачных масс, из которых выпадали осадки интенсивностью до 5–7 мм/час, происходило с северо-западным ведущим потоком вдоль линии фронта со скоростью 50–55 км/час.

Эксперимент по воздействию соевым порошком проводился на периферии фронтальной полосы вблизи города Можайска. На снимке со спутника Метеосат-10 показан район проведения работ по воздействию (рис. 1).

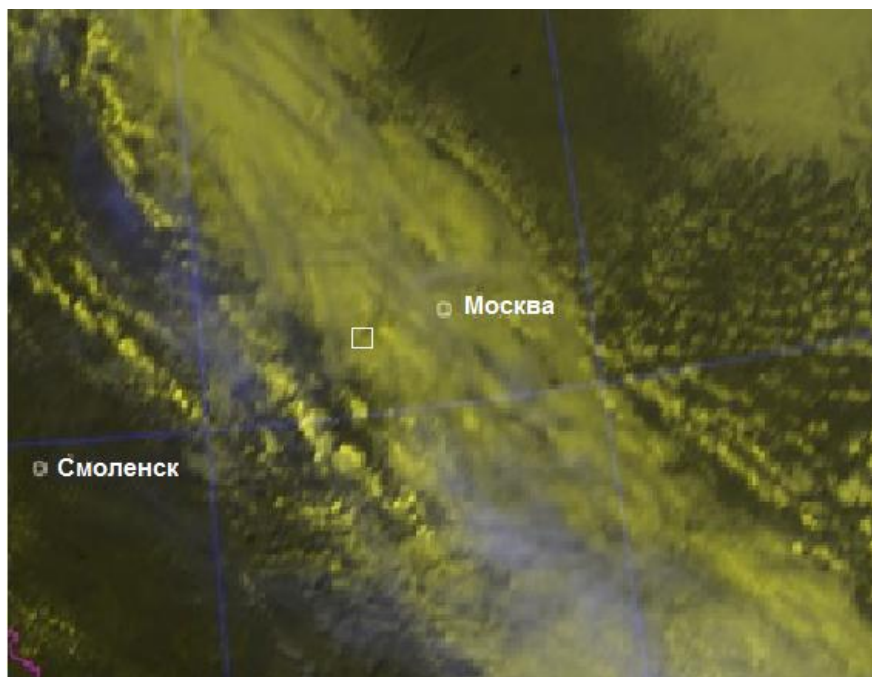


Рис. 1. Фрагмент спутникового снимка Метеосат-10 за 13 ч МСК.

По данным аэрологического зондирования (г. Долгопрудный) в 15 часов МСК нулевая изотерма находилась на высоте 2660 м. Температура на верхней границе облаков (около 4 км) равнялась минус 5°C. Нижняя граница облаков наблюдалась на высоте около 600 м. В период проведения воздействий в данном районе во фронтальных слоистообразных облачных полях наблюдались зоны затопленной конвекции. На рисунке 2 показан снимок верхней границы облачного поля, полученный с самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» во время проведения работ по воздействию солевым порошком. На снимке видны вершины кучевых облаков, выступающих на фоне слоисто-дождевой облачности.

Воздействие производилось путем сброса упаковок с солевым порошком в вершины облаков с самолета Ан-26. В эксперименте был осуществлён сброс 8 упаковок по 10 кг порошка в каждой. Засев облаков порошком производился в 12:51-12:57 МСК (09:51-09:57 UTC) на высоте 3650 м. Контроль эволюции облаков во время натурального эксперимента по воздействию осуществлялся с помощью метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С (Внуково). На рис. 3 показана радиолокационная карта распределения интенсивности осадков во время засева облаков солевым порошком. На карту нанесена траектория полета Ан-26 и места сброса упаковок с порошком.



Рис. 2. Снимок верхней границы облачности с самолета-лаборатории Як-42Д.

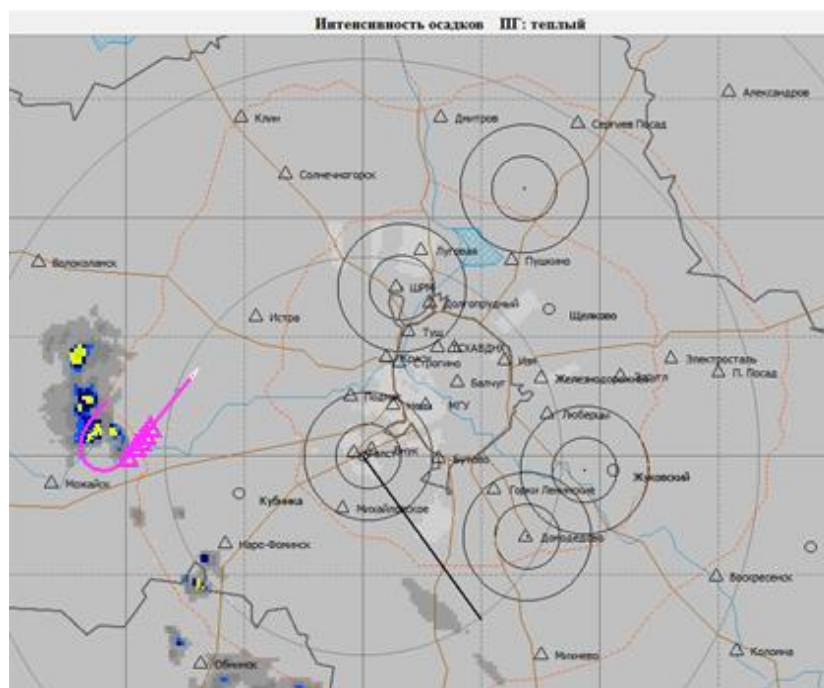


Рис. 3. Схема засева облаков на радиолокационной карте интенсивности осадков в 13:00 МСК.

На рис. 4 показаны горизонтальные сечения облаков на высоте 2 км, полученные радиолокатором ДМРЛ-С в ходе проведения натурного эксперимента. На рисунках также приводятся вертикальные сечения облачности в плоскостях, отмеченных на карте красной линией.

Контроль результатов воздействия осуществлялся по результатам измерений радиолокационных параметров облаков, полученных ДМРЛ-С. В качестве контрольных были выбраны облака, находящиеся на одной линии с объектом воздействия, перпендикулярной направлению смещения облачности, совпадающему с направлением северо-западного ведущего потока вдоль линии облачного фронта. Направление перемещения облаков показано на рис. 4 желтой стрелкой.



Для оценки эффекта воздействия анализировались изменения следующих параметров для объекта воздействия и контрольных облаков:

- максимальная радиолокационная отражаемость;
- интенсивность и количество осадков;
- высота верхней границы облаков.

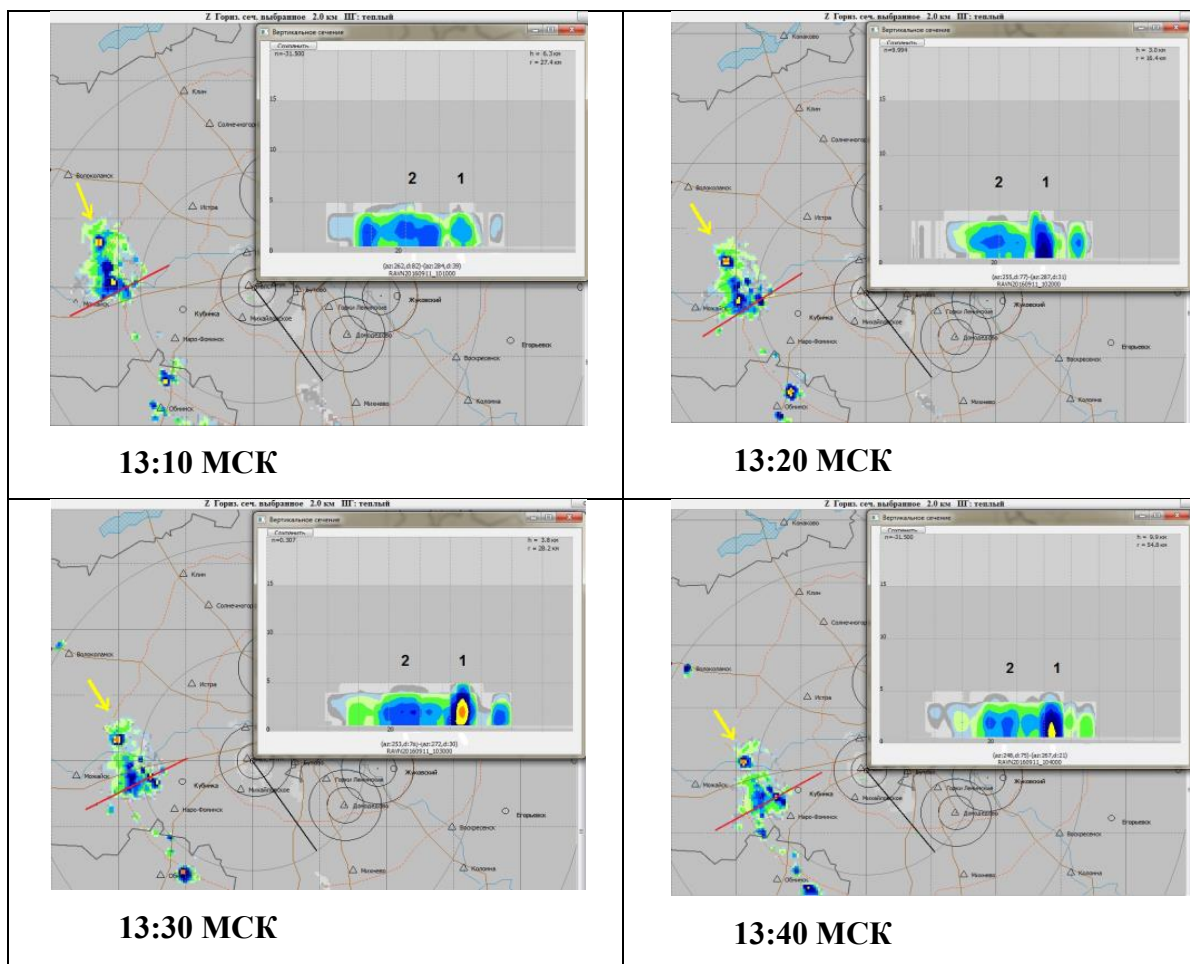


Рис. 4. Горизонтальные и вертикальные сечения облаков после воздействия на них соевым порошком. 1 – объект воздействия; 2 – контрольные облака.

Результаты измерения радиолокационных параметров, характеризующих эффект воздействия соевым порошком, приводятся на рис. 5. Как видно из рисунка, эффект воздействия начинает проявляться через 10-20 мин после засева облачности. При этом возрастает радиолокационная отражаемость подвергнутого воздействию облака и увеличивается интенсивность выпадающих из него осадков.

Максимальная интенсивность осадков достигла 3 мм/ч через 40 мин после воздействия. Интенсивность осадков из контрольных облаков в это же время не превышала 0,6 мм/ч. Верхняя граница облака после воздействия также возрастает, что является признаком интенсификации в

облаке процессов осадкообразования. Выпадение дополнительных осадков из облака наблюдалось в течение 1 часа. Суммарное количество осадков из засеянного облака за это время составило 1,7 мм, в то время как из контрольных облаков количество осадков составило 0,5 мм. Таким образом, в результате воздействия солевым порошком из засеянного облака дополнительно выпало 1,2 мм осадков.

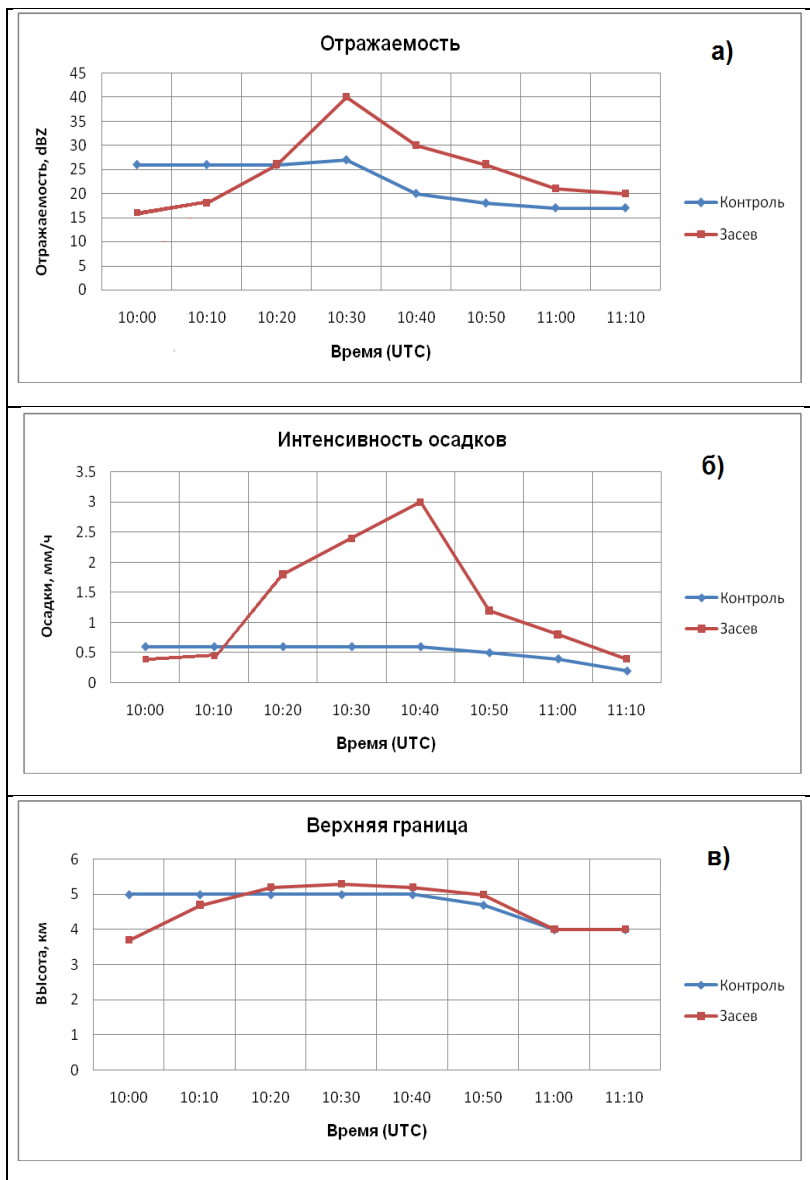


Рис. 5. Временной ход изменения радиолокационной отражаемости (а), интенсивности осадков (б) и верхней границы (в) контрольных облаков и объекта воздействия в натурном эксперименте 11 сентября 2016 г.

Результаты проведенного натурного эксперимента свидетельствуют, что разработанный в ФГБУ «НПО «Тайфун» гигроскопический реагент – солевой порошок – может использоваться для получения дополнительных осадков из слоистообразных облаков с ячейками затопленной конвекции. Результаты натурных испытаний подтверждают, в частности, получен-

ные по результатам численного моделирования выводы о возможности получения дополнительных осадков из теплых конвективных облаков. Для получения достаточно надежных и достоверных данных об эффективности воздействия разработанным солевым порошком необходимо проведение дальнейших натурных экспериментов при различных метеорологических условиях.

### ***Список литературы***

1. Белова М.В., Дрофа А.С. (2016). Исследование воздействия гигроскопическими реагентами на конвективное облако по результатам численного моделирования – Труды ГГО. 2016. Вып. 582. С 184–201.
2. Беляева М.В., Дрофа А.С., Иванов В.Н. (2013). Эффективность стимулирования осадков из конвективных облаков солевыми порошками // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т.49. №2. С.171-179.
3. Дрофа А.С. (2010). Исследование воздействия гигроскопическими частицами на теплое конвективное облако по результатам численного моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т.46. № 3. С. 348-362.
4. Дрофа А.С., Ераньков В.Г., Иванов В.Н., Шилин А.Г., Яскевич Г.Ф. (2013). Экспериментальные исследования эффективности воздействия солевыми порошками на конвективное облако для увеличения осадков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т.49. №3. С.327-335.
5. Сталевич Д.Д. (1972). Вызывание искусственных осадков с помощью гигроскопических веществ. – Труды ГГО. 1972. Вып. 278. С 3 – 18.
6. Brintjes R.T. A Review of Cloud Seeding Experiments to Enhance Precipitation and Some New Prospects // Bul. Amer. Met. Soc. 1999. V.80. № 5. Pp. 805-820.
7. Drofa A.S, Ivanov V.N., Rosenfeld D. and Shilin A.G. (2010) Studying an effect of salt powder seeding used for precipitation enhancement from convective clouds // J. Atmos. Chem. Phys. V.10. № 16. P. 8011–8023.
8. Mather G. K., Terblanche D.E., Steffens F.E. and Fletcher L. (1997). Results of the South African Cloud-seeding Experiments Using Hygroscopic Flares // J. Appl. Met. 1997. V.36. P.1433–1447.
9. Silverman B. A., Sukarnjanasat W. (2000). Results of the Thailand warm-cloud hygroscopic particle seeding experiment // J. Appl. Met. 2000. V. 39. P. 1160-1175.
10. Woodley W.L., Rosenfeld D. The development and testing of a new method to evaluate the operation cloud seeding program in Texas // J. Appl. Met. 2004. V.43. № 2. P. 249-263.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРАХ, НА ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ**

**Куров А.Б., Веремей Н.Е., Синькевич А.А., Волков Н.Н.**

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

В результате лесных пожаров ежегодно в атмосферу поступает большое количество продуктов горения (оксиды азота и углерода, метан, озон и др.), в том числе в виде аэрозольных частиц (сажа и др.). Известно, что частицы сажи в атмосфере могут выступать как в роли дополнительных ядер конденсации (Hobbs, Radke, 1969), так и в роли ядер кристаллизации (Hobbs, Locatelli, 1969), тем самым оказывая влияние на развитие облаков, процессы осадкообразования и др. В ряде работ показано, что льдообразующие свойства сажевого аэрозоля зависят от размера частиц, их концентрации в каплях, а также физико-химических свойств. На практике спектр размеров частиц и их структура может варьировать в достаточно широких пределах в зависимости от особенностей процесса горения, вида источника и внешних условий.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния частиц сажи и золы, образующихся при горении древесных пород, на температуру замерзания капель воды. Исследования проводились в лабораторных условиях с использованием малой холодильной камеры «Капля» объемом 0,006 м<sup>3</sup> (Довгалюк и др., 2008). В ходе экспериментов изучался иммерсионный механизм кристаллизации отдельных крупных (диаметром ~1мм) капель дистиллированной воды в присутствии аэрозольных частиц. Для этого исследуемая капля, содержащая внутри себя частицы сажи или золы, и контрольная капля дистиллированной воды без примесей подвешивались внутри холодильной камеры на синтетической нити. В процессе охлаждения с помощью малоинерционного термометра регистрировалась температура воздуха в зоне подвеса капель, что позволяло достаточно точно определять момент начала замерзания капель по выбросу скрытой теплоты кристаллизации и соответствующую начальную температуру.

В качестве примера на рисунке 1 приведен график изменения температуры воздуха рядом с исследуемыми каплями, полученный в ходе проведения одного из экспериментов. На графике видно, что по мере охлаждения рабочего объема камеры температура воздуха плавно понижается. По достижении температуры -9,6°С наблюдается появление импульса на графике, обусловленного началом процесса кристаллизации капли содержащей частицы золы.

Аналогичное повышение температуры имеет место и при  $T = -16^{\circ}\text{C}$ , соответствующее замерзанию контрольной капли - капли дистиллированной воды без примеси.

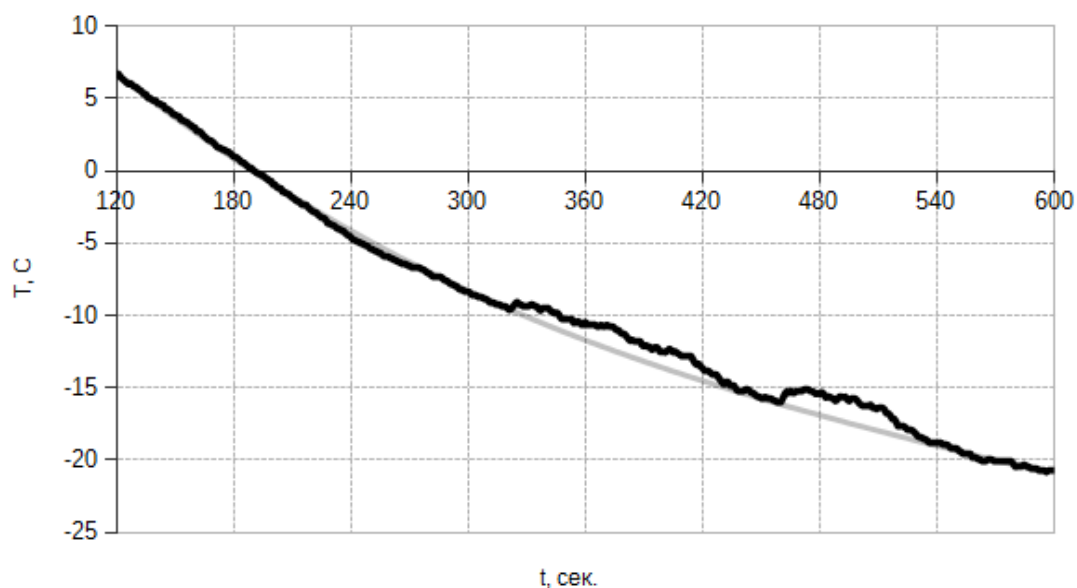


Рис. 1. Пример изменения температуры воздуха вблизи от исследуемых капель.

Проведенные лабораторные исследования показали, что наличие аэрозольных частиц в каплях воды повышает вероятность их замерзания при более высоких температурах. Результаты двух серий экспериментов, направленных на изучение температуры замерзания капель, содержащих частицы сажи и золы, представлены в виде графиков на рисунках 2 и 3. Среднее значение температуры кристаллизации капель дистиллированной воды без примесей в проведенных экспериментах варьировалось в диапазоне  $-17 \div -15^{\circ}\text{C}$ . При наличии в капле частиц сажи температура кристаллизации в среднем составляла  $-14 \div -12^{\circ}\text{C}$ . При этом необходимо отметить, что в проведенных экспериментах наблюдалась зависимость температуры замерзания капель с частицами сажи от массовой доли вещества в капле (Куров и др., 2015). Аналогичная тенденция прослеживается и у капель, содержащих частицы золы: с ростом количества вещества в капле, температура замерзания увеличивается. Среднее значение температуры кристаллизации капель с частицами золы находилось в пределах  $-10 \div -8^{\circ}\text{C}$ . Максимальные значения температуры замерзания капель воды при наличии в них аэрозольных частиц составили для сажи и золы  $-8^{\circ}\text{C}$  и  $-5,2^{\circ}\text{C}$ , соответственно. Минимальные значения температуры кристаллизации и для сажи, и для золы составили около  $-14^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, из полученных результатов видно, что частицы золы способны обеспечить замерзание капель воды при более высоких значениях температуры.

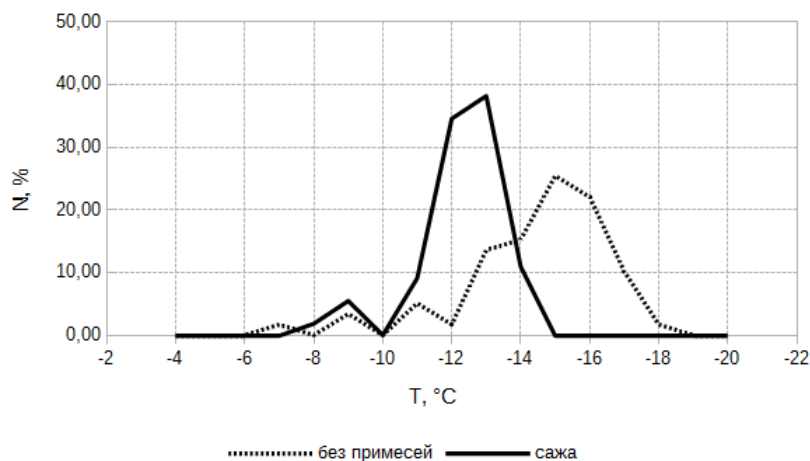


Рис. 2. Повторяемость температуры замерзания капель дистиллированной воды в отсутствие примесей и при наличии в них частиц сажи.

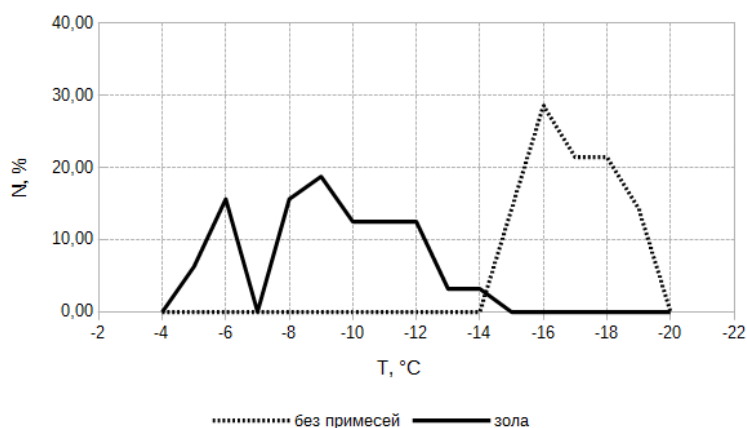


Рис. 3. Повторяемость температуры замерзания капель дистиллированной воды в отсутствие примесей и при наличии в них частиц золы.

Визуальные наблюдения за процессом кристаллизации капель, содержащих примеси в виде частиц сажи и золы, показали, что в проведенных экспериментах промерзание исследуемой капли, как правило, начинается с ее поверхности с последующим распространением фронта кристаллизации внутрь капли, что, вероятно, обусловлено особенностями подвеса капель на нити. В качестве примера на рисунке 4 приведены изображения кристаллизующейся капли дистиллированной воды, содержащей частицы золы, в различные моменты времени: перед началом кристаллизации (рис. 4А), в момент «схватывания» капли (рис. 4Б), промерзание капли (рис. 4В, 4Г, 4Д) и по окончании процесса кристаллизации (рис. 4Е). Весь процесс кристаллизации капли сопровождается изменением ее прозрачности.

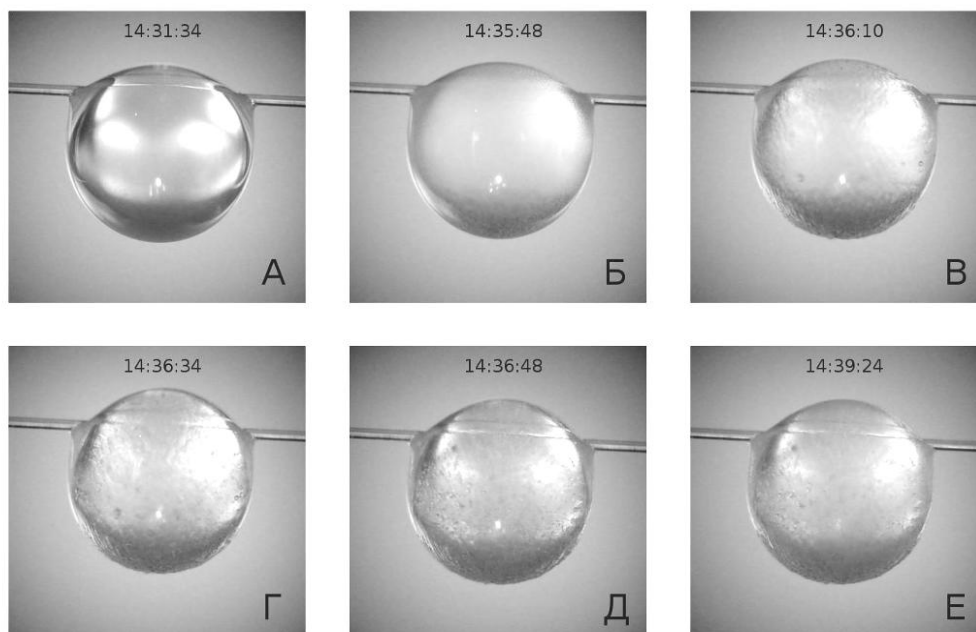


Рис. 4. Кристаллизация капли дистиллированной воды, содержащей частицы золы.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-05-05719А.*

#### **Список литературы**

1. Довгалюк Ю.А., Синькевич А.А., Степаненко В.Д., Веремей Н.Е., Волков Н.Н., Куров А.Б., 2008. Состояние и перспективы развития лабораторного комплекса ГГО для исследований в области физики облаков и активных воздействий// В сб. «Вопросы физики облаков: 50 лет отделу физики облаков ГГО», СПб: Астерион, с.334-361.
2. Куров А.Б., Веремей Н.Е., Волков Н.Н., Летенко Д.Г., Михайловский В.Ю., Синькевич А.А., 2015. Влияние сажевых частиц на кристаллизацию капель воды. // Тр. ГГО, вып. 579, с.205-213.
3. Hobbs P.V., Locatelli J.D., 1969. Ice Nuclei from a Natural Forest Fire // J. Appl. Meteor., 8, 833–834.
4. Hobbs P.V., Radke L.F., 1969. Cloud condensation nuclei from a simulated forest fire // Science, 163, 279–280.

## ЛЬДООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ОКСИДА ЦИНКА

Хучунаев Б.М., Ташилова А.А., Теунова Н.В., Хучунаев А.Б.

ФБГУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

### Введение

В качестве реагента для управления облачными процессами обычно используют химические вещества, обладающие конденсационными и кристаллизационными свойствами. При этом не достаточно изученными остаются вопросы, связанные с образованием самих частиц реагента. Основное количество частиц реагента имеет размер 10-100 нм. В этой области размеров значение поверхностных явлений сильно возрастает, усиливается взаимодействие частиц друг с другом. Это оказывает существенное влияние на фазовые переходы и образование частиц реагента.

В последние годы интенсивное развитие исследований образования новой фазы и роста частиц в наноразмерном диапазоне открывает возможность создания более эффективных реагентов для воздействия на облачные процессы и туманы. Увеличение эффективности реагентов возможно с одной стороны за счет увеличения удельного выхода количества частиц, не уменьшая площади поверхности частиц и с другой стороны за счет усиления электрического поля на самих частицах реагента. Обе задачи решаются, если синтезировать реагент в виде нанотрубок.

Основной целью данной работы, является синтез реагента ZnO в виде нанотрубок и исследование их льдообразующих свойств.

### Аппаратура и методика

В лаборатории микрофизики облаков ФБГУ «ВГИ» был разработан комплекс аппаратуры и метод для синтеза нанотрубок ZnO, которые представлены на рис.1.

В состав комплекса входит: вакуумная установка, камера возгонки, большая облачная камера, электронный микроскоп ЭММА-4, оптический микроскоп МБИ-15, оптический микроскоп Motic.

Для получения нанотрубок в начальном этапе исследования использовалась вакуумная установка. Из графита изготавливалась лодочка длиной 5-6 см, шириной 1 см и зажималась между электродами. К электродам в вакуумной камере прикладывалось постоянное напряжение 9В. Исходное вещество для синтеза нанотрубок ZnO помещалось в лодочку. Вакуумная установка была покрыта стеклянным колпаком в целях предотвращения распыления вещества в лаборатории, при этом оставался небольшой доступ кислорода в вакуумную камеру. Максимальный ток через лодочку достигал примерно 100-150 А.





Рис. 1. Комплекс лабораторной аппаратуры, где проводился синтез нанотрубок оксида цинка: 1 – электронный микроскоп ЭММА-4, 2 – оптический микроскоп МБИ-15, 3 – вакуумная установка, 4 – большая облачная камера, 5 – оптический микроскоп Motic.

Процесс синтеза длился 3-4 минуты. Синтезированное вещество (нанотрубки ZnO) представлено на рис. 2.

Эксперименты проводились под колпаком вакуумного поста. Температура возгонки состава от  $1000^{\circ}\text{C}$  до  $2500^{\circ}\text{C}$ . Частицы собирались на стеклянные подложки, которые исследовались под оптическим микроскопом МБИ-15. Для исследования под электронным микроскопом пробы осаждали на угольную пленку. На рис. 3 приводится фотография нанотрубок оксида цинка под электронным микроскопом.

Большая облачная камера использовалась для изучения льдообразующих свойств нанотрубок ZnO при различных термодинамических условиях. Она представляет собой прямоугольную емкость объемом  $8\text{ м}^3$  с теплоизолированными стенками. Внутри камера облицована металлическим листом из оцинкованного железа и охлаждается с помощью трех холодильных агрегатов.



Рис. 2. Нанотрубки оксида цинка.

Камера снабжена системой регулировки температуры. Температура в камере может поддерживаться от 0°С до –17°С. Внутри камеры размещается зонд термоанемометра для контроля температуры и вентилятор для перемешивания водяного пара. Для уменьшения градиента температуры камера была оклеена специальной теплоизоляционной пленкой и были установлены четыре вентилятора для перемешивания воздуха.

Метод дугового разряда для получения наночастиц был использован в работах [1,2], в которых были получены много различных наноматериалов оксида цинка.

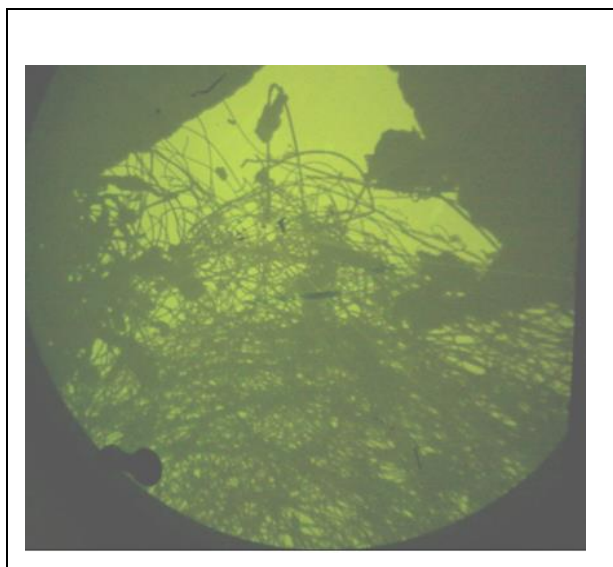


Рис.3. Нанотрубки оксида цинка под электронным микроскопом.

Дуговой синтез проводился в вакуумной и в большой облачной камере. В кювету из графита толщиной 0,5 см, длиной 7-9 см и шириной 2 см укладывались кусочки цинка размерами 0,4 см x 0,4 см, туда же насыпался порошок графита, масса которого составляла 8% от массы цинка. Графит служит в качестве катализатора роста нанотрубок. Дуговой разряд достигался при следующем режиме: напряжение - 30-40 В; сила тока– 80-150А. Разряд поддерживался в течение 2 - 5 минут.

Для исследования льдообразующих свойств синтезированных нанотрубок ZnO при различных температурах была проведена серия экспериментов по определению удельного выхода кристаллов. Эксперименты проводились в большой и малой облачных камерах ВГИ. Эксперименты проводились двумя методами:

1. Стандартный метод - возгонка реагента в камере и перенос известного объема воздуха с реагентом в охлажденную облачную среду.

2. Метод, при котором возгонка производилась в охлажденной среде в большой облачной камере. При проведении экспериментов по второму методу оценивались фоновые значения числа льдообразующих ядер при включенной подложке. Фоновое значение не превышало 2-3 кристалла в поле зрения микроскопа (4 мм<sup>2</sup>).

Сначала в большую облачную камеру запускали пар и там же сжигали реагент. Кристаллы оседали на подложки, которые извлекались из камеры и фотографировались под микроскопом Motic (рис.8). Затем считалось количество кристаллов на подложке. Для пересчета количества кристаллов на площадь камеры по подложкам определялось среднее количество кристаллов на 1 мкм<sup>2</sup>, и производился пересчет на всю площадь камеры ( $S_{м.к}= 3 \times 10^{12}$  мкм<sup>2</sup>).

Удельный выход определялся по формуле:

$$A = \frac{n_{кр}}{m_{реаг}}, \quad (1)$$

где  $n_{кр}$  – количество кристаллов в малой облачной камере, м<sup>-3</sup>;  $m_{реаг}$  – масса внесенного реагента, г.

Результаты экспериментов и проведенных расчетов по удельному выходу кристаллов приведены в таблице 1 и на рис. 4.

Таблица 1

**Удельный выход кристаллов при внесении нанотрубок оксида цинка**

Реагент	Масса реагента, г	Температура в камере, °С	Удельный выход, *10 <sup>7</sup>
1	2	3	4
Zn+Fe	0,39996	-9,0	15,2
Zn+Fe	0,039996	-7,5	140
Zn+Fe	0,039996	-7,2	50
Zn+Fe	0,039996	-6,6	220
Zn+Fe	0,039996	-7,3	610
Zn+Fe	0,033	-7,1	520
Zn+Fe	0,033	-9,5	530
Zn	0,03	-5,7	590
Zn	0,03	-5,8	210
Zn	0,03	-5,1	1400
Zn	0,03	-4,9	1750
Zn	0,007	-5,6	4190
Zn	0,007	-4,6	16100
Zn	0,007	-4,5	17000
Zn	0,0001	-0,2	1700000
Zn	0,0001	-4,2	144000
Zn	0,0001	-4,6	64500
Zn	0,0001	-2,0	1800000
Zn	0,0001	-1,6	2145000
Zn	0,0001	-1,1	1110000
Zn	0,0001	-3,2	480000
Zn	0,0001	-1,5	188000

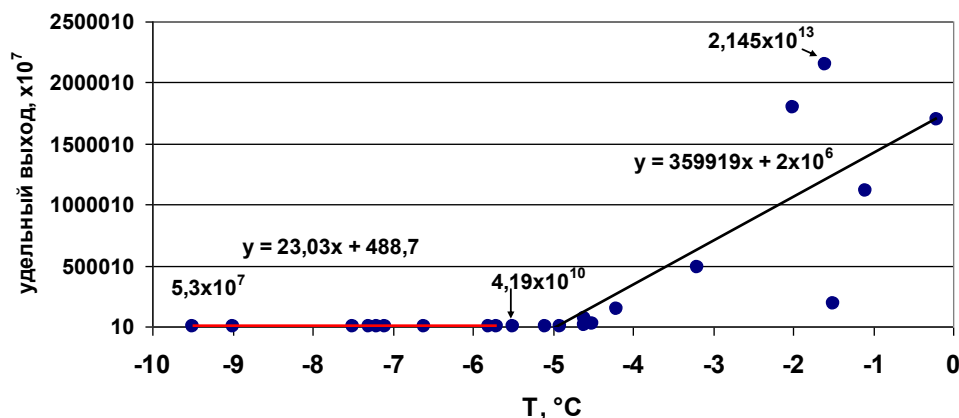


Рис. 4. График зависимости удельного выхода кристаллов от температуры  $T$  в двух диапазонах (с линейными трендами)

На рис. 4 представлен график рассеяния с двумя линейными трендами: в «холодном» диапазоне температур  $\{-10^{\circ}\text{C} \text{ :-} -5,5^{\circ}\text{C}\}$  и в «теплом» диапазоне температур  $\{-5,5^{\circ}\text{C} \text{ :-} 0^{\circ}\text{C}\}$

Для удельного выхода кристаллов в «холодном» диапазоне температур от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-5,5^{\circ}\text{C}$  уравнение линейного тренда имеет вид:

$$Y_1 = (A_1 t_1 + C_1) \times K \quad (2)$$

где  $Y_1$  – удельный выход кристаллов  $[\text{г}^{-1}]$ ;  $A_1$  – угловой коэффициент,  $A_1 = 23,03 [^{\circ}\text{C}^{-1} \times \text{г}^{-1}]$ ;  $t_1$  – температура в диапазоне  $\{-10^{\circ}\text{C} \text{ :-} -5,5^{\circ}\text{C}\}$ ;  $C_1$  – свободный член,  $C_1 = 488,7 [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ ;  $K$  – коэффициент,  $K = 10^7 [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ .

Для удельного выхода кристаллов в «теплом» диапазоне температур от  $-5,5^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$  уравнение линейного тренда имеет вид:

$$Y_2 = (A_2 t_2 + C_2) \times K_2 \quad (3)$$

где  $Y_2$  – удельный выход кристаллов  $[\text{г}^{-1}]$ ;  $A_2$  – угловой коэффициент,  $A_2 = 359919 [^{\circ}\text{C}^{-1} \times \text{г}^{-1}]$ ;  $t_2$  – температура в диапазоне  $\{-5,5^{\circ}\text{C} \text{ :-} 0^{\circ}\text{C}\}$ ;  $C_2$  – свободный член,  $C_2 = 2 \times 10^6 [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ ;  $K$  – коэффициент,  $K = 10^7 [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ .

На рис. 4 видно, что в результате серии экспериментов при переходе температуры из «холодного» диапазона  $\{-10^{\circ}\text{C} \text{ :-} -5,5^{\circ}\text{C}\}$  в «теплый» диапазон  $\{-5,5^{\circ}\text{C} \text{ :-} 0^{\circ}\text{C}\}$  удельный выход кристаллов увеличивается «скачком», на несколько порядков, и в указанном «теплом» диапазоне  $\{-5,5^{\circ}\text{C} \text{ :-} 0^{\circ}\text{C}\}$  при увеличении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  удельный выход кристаллов увеличивается с нескольких десятков до нескольких сотен тысяч (уравнения 2 и 3).

### Заключение

Таким образом, результаты проведенных экспериментов показали следующее:

- льдообразующие свойства реагента на основе нанотрубок оксида цинка проявляются при возгонке непосредственно в облачной среде;

-удельный выход льдообразующих ядер зависит от температуры среды, где производится возгонка реагента в температурном диапазоне от 0°C до -10°C. Наибольший удельный выход ( $3 \times 10^{13} \text{ г}^{-1}$ ) получен в диапазоне от 0°C до -2°C;

-удельный выход льдообразующих ядер при температурах возгонки от 0°C до -2°C составил  $3 \times 10^{13} \text{ г}^{-1}$ , при температурах возгонки от 5°C до -10°C -  $1,2 \times 10^{11} \text{ г}^{-1}$ .

Реагент на основе нанотрубок оксида цинка можно рекомендовать использовать как добавку к традиционным составам на основе AgI с целью увеличения удельного выхода в температурном диапазоне от 0°C до -4°C.

Такие комплексные составы позволят расширить температурный диапазон эффективного использования реагентов на основе AgI, тем самым увеличить число объектов активного воздействия и повысить эффективность работ по вызыванию дополнительных осадков. Но для более конкретных рекомендаций требуются дополнительные исследования по определению удельного выхода комплексных составов с добавками цинка в температурном диапазоне от 0°C до -4°C.

### **Список литературы**

1. Тапасханов В.О., Хучунаев Б.М., Хучунаев А.Б., Панаэтов В.П. Предварительные результаты исследования льдообразующих свойств Оксида цинка и AgI // Доклады всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 7-9 октября 2014г., часть 2 стр.190-194.

2. Тапасханов В.О., Хучунаев Б.М., Глисов М.И., Хучунаев А.Б., Куповых Г.В. Предварительные результаты исследования конденсационных льдообразующих свойств нанотрубок AgI и оксида цинка // Известия ВУЗов Северо-Кавказский регион, №6, 2014г., с. 40-43.

## **ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТДЕЛЬНОЙ ГРАДОВОЙ ЯЧЕЙКИ**

**Инюхин В.С., Березинский И.Н., Чередник Е.А.**

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Очевидно, наиболее значимый результат автоматизированных радиолокационных исследований градовых процессов видится в создании и постоянном уточнении эмпирической (физико-статистической) модели градовых облаков различных типов [4,5,8,9]. Для этого необходимы регулярные радиолокационные исследования облаков и систематизация полученных результатов путем создания базы радиолокационных данных [3].

В работах [1,2,6,7] при исследовании динамических характеристик градовых процессов центральной части Северного Кавказа проведена типизация траекторий перемещения градовых облаков многоячейкового и суперячейкового типов. В [7] к тому же проводится сопоставительный анализ аэросиноптических и термодинамических условий формирования и развития градовых облаков в различных физико-географических регионах.

В ВГИ был накоплен большой объем данных об облаках, дающих град, анализ которых позволяет уточнить существующую эмпирическую модель конвективных ячеек, входящих в состав градовых облаков различных типов. Применение статистического анализа к полученным данным позволило получить распределения основных параметров ячеек, дающих град [13-15]. При этом, кроме радиолокационных данных анализировались синоптическая и аэрологическая информации за дни с градом.

В данной статье приводятся результаты дальнейшего анализа данных комплексных радиолокационных исследований градовых облаков в центральной части Северного Кавказа. Они охватывают период с 2003 по 2015 годы.

Климат Северного Кавказа умеренно-континентальный, в восточной его части отличается сухостью с большими амплитудами температуры воздуха. Предкавказье и северный склон Большого Кавказа (до высоты 2000 м) образуют единую климатическую область. Засушливые климаты равнин по мере увеличения высоты переходят в бореальные климаты лесов и горных лугов [16].

Град на изучаемой территории наблюдается преимущественно в теплую половину года и на местности выпадает пятнами или полосами длиной несколько километров. В отдельных случаях протяженность градовых дорожек составляет 100 км и более при ширине свыше 10 км [11]. Выпадение града сопровождается ливневыми осадками, грозами и иногда шквалистыми усилениями ветра. Как правило, интенсивные градовые процессы наблюдаются при прохождении атмосферных фронтов.

Развитию грозоградовых процессов способствует большая влажность в нижнем слое тропосферы, резкие температурные различия по высотам, а также особенности рельефа, обуславливающие развитие орографических вертикальных движений.

Важным моментом в изучении особенностей развития конвективных облаков являются исследования синоптических факторов, приводящих к развитию града в облаке. К таким факторам можно отнести направление и скорость ведущего потока, температуру и влажность воздуха, а также общую энергию неустойчивости атмосферы, которая проявляется в величине скорости восходящих потоков. На рис. 1 приводятся диаграммы повторяемости направлений и скорости ведущего потока в дни с градом на территории КБР за три летних месяца, построенные по аэросиноптическим данным.

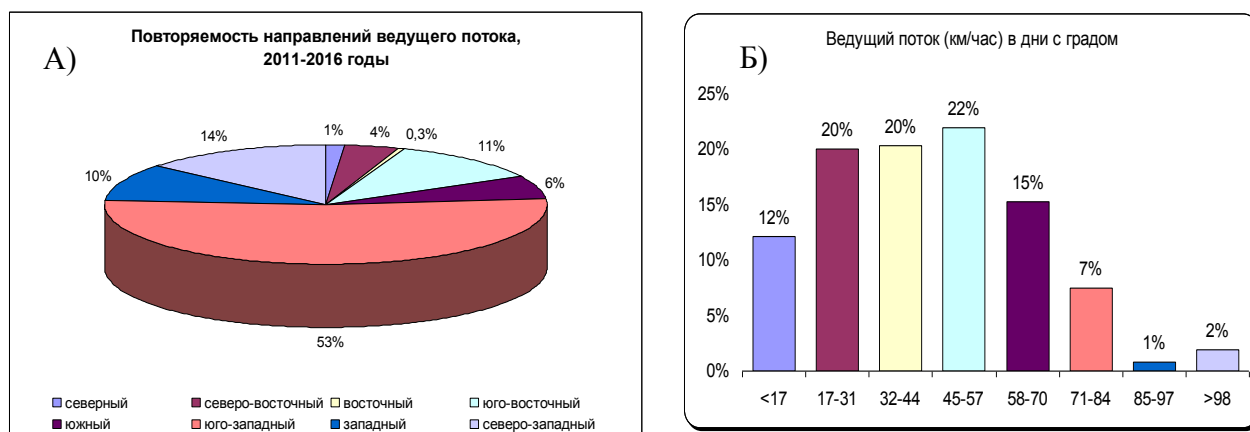


Рис. 1. Распределение направлений (А) и скорости ведущего потока (Б) в дни с градом.

Из анализа диаграмм, приведенных на рис. 1, можно сделать вывод о том, что ведущий поток во всех рассматриваемых случаях имеет преимущественно западное направление. За тринадцать лет западное, северо-западное и юго-западное направления в среднем в сумме составляют 77% всех направлений ведущего потока, а восточные направления за шесть лет в среднем составляют 15,3%. Как показал анализ данных (рис. 1Б), скорость ведущего потока в дни с градом может иметь довольно широкий диапазон значений от 4 до 110 км/ч. Среднее значение скорости соответствует 42,5 км/ч.

На рис. 2 представлены гистограммы с распределением температуры (А) и влажности воздуха (Б) в дни с градом.

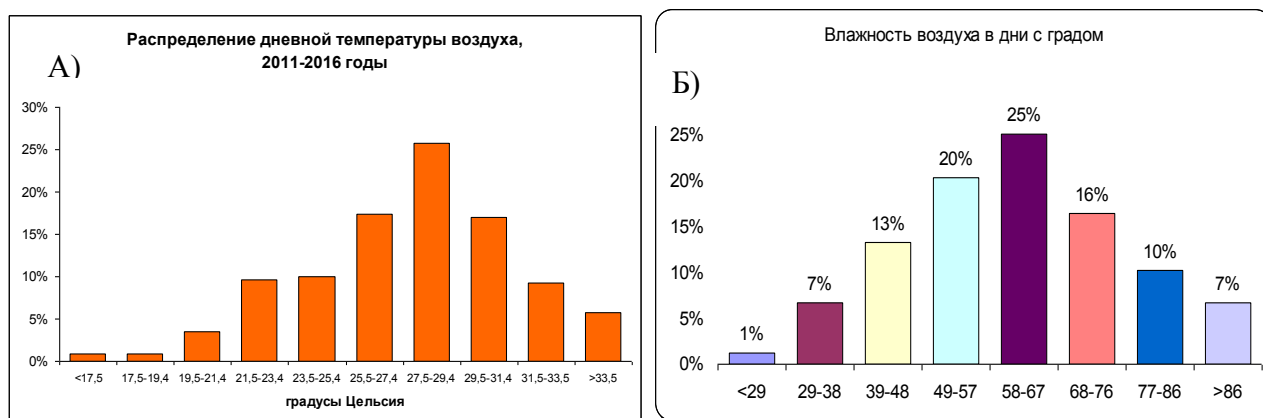


Рис. 2. Распределения дневной температуры (А) и влажности воздуха (Б) в дни с градом.

На рис. 3 представлено распределение скорости восходящих потоков.



Рис. 3. Распределение скорости восходящих потоков в дни с градом.

В табл. 1 представлены наиболее вероятные значения метеорологических параметров, рассмотренные выше.

Таблица 1

**Наиболее вероятные значения метеорологических параметров**

Наименование параметра	Мин.	Макс.	Сред.	Станд. отклонение	Интервал	Вероятность попадания в интервал, %
Направление ведущего потока					С-З, З, Ю-З	77
Скорость ведущего потока, км/ч	4	110	42,5	21,3	20-70	77
Температура воздуха, °С	15,5	37,5	27,3	3,8	20-30	80
Влажность воздуха, %	20	95	61	15,6	40-85	80
Скорость восходящего потока, м/с	10	38	17,8	5,0	13-25	75

Статистический анализ данных метеорологических наблюдений позволил получить распределения различных параметров, характеризующих состояние атмосферы в дни развития конвективных ячеек различных типов в регионе наблюдений. На основании сопоставления результатов исследования с аналогичными параметрами других регионов можно выявить некоторые глобальные характеристики атмосферы в период развития градовых облаков.

На основании радиолокационных исследований были получены распределения динамических, энергетических и микрофизических характеристик градовых облаков.

На рис. 4 и 5 приведены распределение направлений перемещения градовых ячеек, осредненные за 13 лет наблюдений и диаграмма повторяемости скоростей перемещения градовых ячеек, полученная по данным радиолокационных измерений соответственно.





Рис. 4. Повторяемость направления перемещения градовых ячеек.

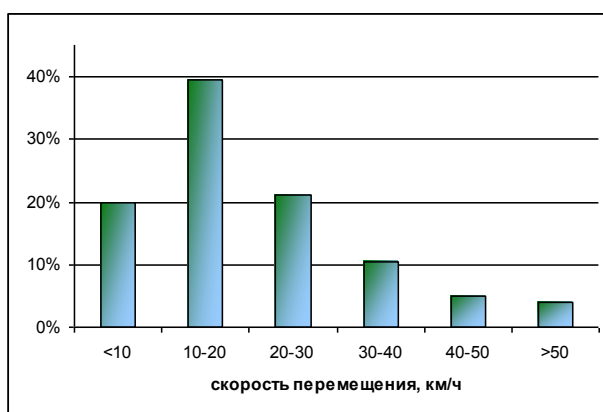


Рис. 5. Повторяемость скоростей перемещения градовых ячеек

В соответствии с рис.4 видно, что повторяемость направлений перемещения градовых ячеек описывается одномодальным законом распределения с максимумом, приходящимся на северо-западное направление, средним значением 229 градусов, стандартным отклонением 91,9. Сравнение рис.1 и 4 показывает, что полученные распределения скоростей ведущего потока и перемещения облаков хорошо согласуются. Из рис.5 видно, что в 80% случаев скорость ячеек не превышает 30 км/час с максимумом 10-20 км/час (40% случаев). При этом среднее значение скорости – 20,5 км/час со стандартным отклонением 14,1 км/час.

Из анализа данных рис.6 видно, что в более чем 60% случаев за время своего существования ячейки проходят расстояние 10-50 км. Очень редко, в 10% случаев, ячейки проходят расстояние более 90 км. При этом среднее значение полученного распределения приходится на значение 41,1 км, а стандартное отклонение на 37,6 км.

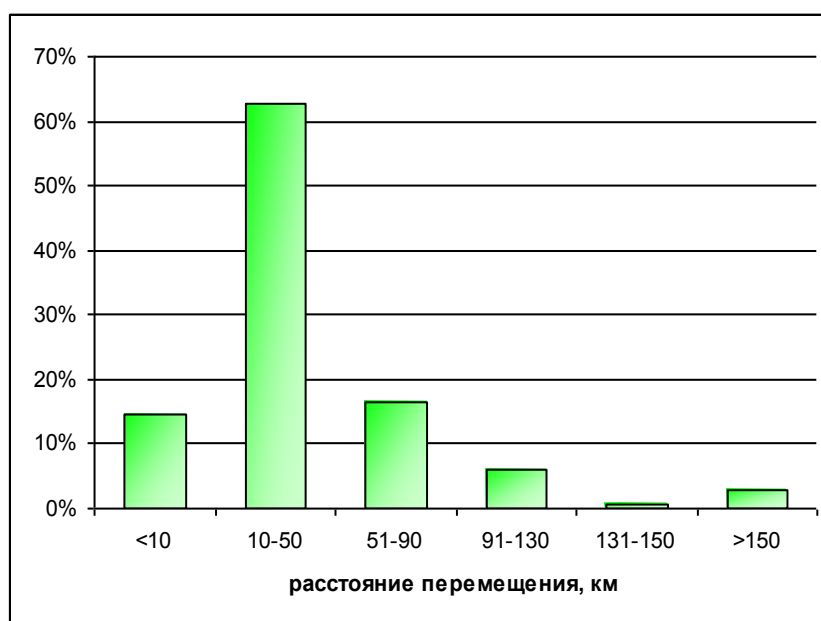


Рис. 6. Повторяемость расстояния перемещения градовых ячеек за время их жизни.

Наряду с динамическими характеристиками перемещения градовых ячеек большой интерес представляют энергетические параметры развития градовых ячеек. Ниже представлены гистограммы повторяемости некоторых из этих параметров, полученных в период максимального развития ячеек.

На рис. 7 приводится диаграмма повторяемости высот верхней границы радиоэха облаков. Из анализа рисунка видно, что в 90% случаев верхняя граница градовых ячеек в период их максимального развития расположена на высотах 8-13,5 км, а ячейки с высотой верхней границы больше 10 км составляют 75%. Среднее значение высоты верхней границы для рассмотренных градовых ячеек составило 11,0 км при стандартном отклонении 1,7.



Рис. 7. Повторяемость высоты верхней границы градовых ячеек

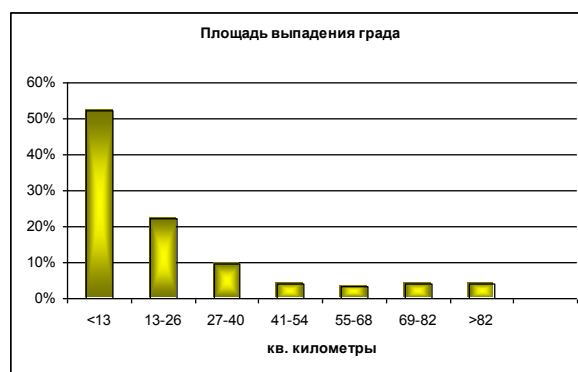


Рис. 8. Повторяемость площади выпадения градовых осадков (град с дождем) в период максимального развития ячеек.

Анализ рис.8 показывает, что в 85% случаев площадь выпадения градовых осадков из отдельных градовых ячеек в период их максимального развития не превышает 40 км<sup>2</sup>. Среднее значение площади выпадения града для рассмотренных градовых ячеек составило 21,1 км<sup>2</sup> при стандартном отклонении 20,1 км<sup>2</sup>.

В соответствии с рис. 9 можно увидеть, что в 90% случаев объем зоны локализации града не превышает 245 км<sup>3</sup> - это куб со стороной 6,3 км. Среднее значение объема зоны локализации града для рассмотренных градовых ячеек составило 135,8 км<sup>3</sup> при стандартном отклонении 127,7 км<sup>3</sup>.

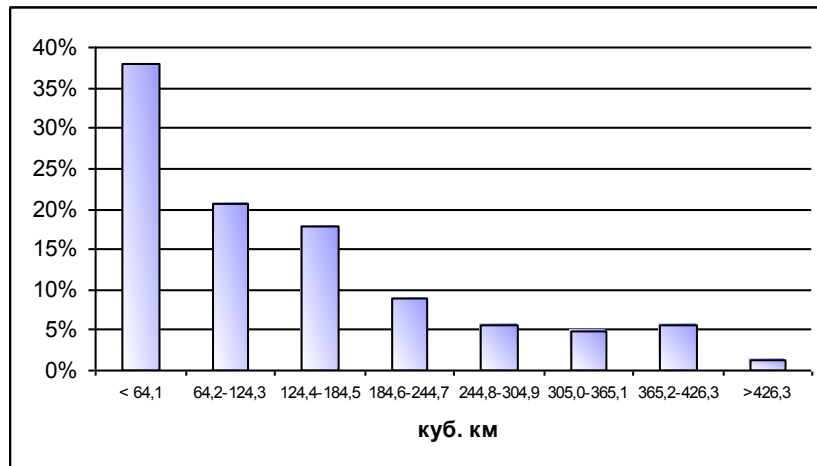


Рис. 9. Повторяемость величины объема зоны локализации града в градовых ячейках в период их максимального развития.

Ниже представлены некоторые временные характеристики градовых ячеек, которые непосредственно связаны с типом градовых процессов и их мощностью.

Среднее время выпадения града для рассмотренных градовых ячеек составило 45 минут при стандартном отклонении 37 мин. Из рис. 10 видно, ограничивается 1,5 часами. Более половины ячеек (60%) дают град не более 50 минут, что в подавляющем числе случаев (90%) является временем выпадения града из отдельной ячейки. Среднее значение времени жизни для рассмотренных градовых ячеек (рис. 11) составило 113 минут при стандартном отклонении 40 мин.

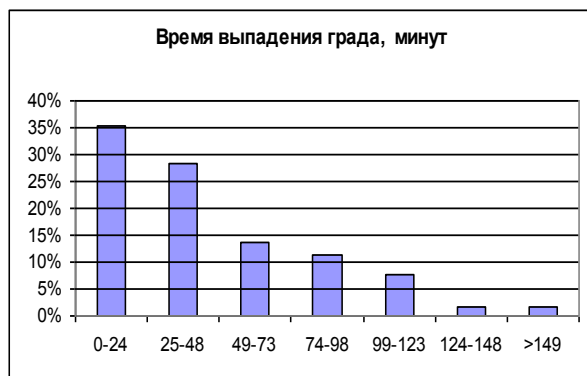


Рис. 10. Повторяемость времени выпадения града из градовой ячейки



Рис.11. Повторяемость времени жизни градовых ячеек.

Среднее значение времени достижения рассмотренными ячейками градового состояния составило 23,6 минуты при стандартном отклонении 11,2 мин.

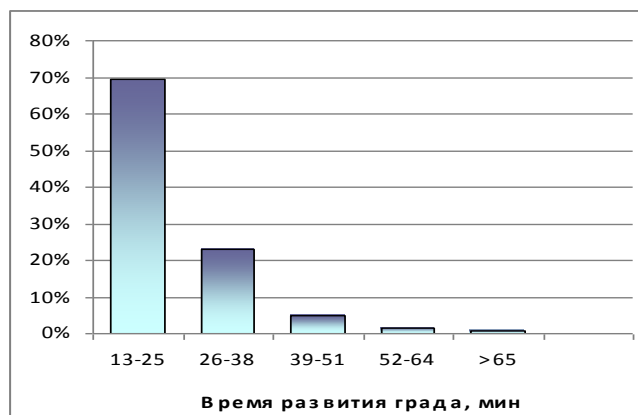


Рис. 12. Повторяемость времени от начала развития ячейки до градового состояния.

Как показали исследования, существенную роль в пространственно-временном распределении града играет рельеф. В горах на активность грозоградовых процессов большое влияние оказывает форма рельефа и экспозиция склонов, а также высота над уровнем моря [7]. Из данных, приведенных в работе [7], следует, что чаще всего градовые облака зарождаются в предгорьях над поверхностью с высотой от 200 м до 1500 м.

Это еще раз подтверждает тезис о том, что вторжение воздушных масс вызывает активизацию конвекции в горных районах за счет конвергенции воздушных потоков в районах сужения долин и за счет вынужденного подъема воздуха на наветренных склонах [7]. На рис. 13 приведена карта района появления первого радиоэха градовых облаков.

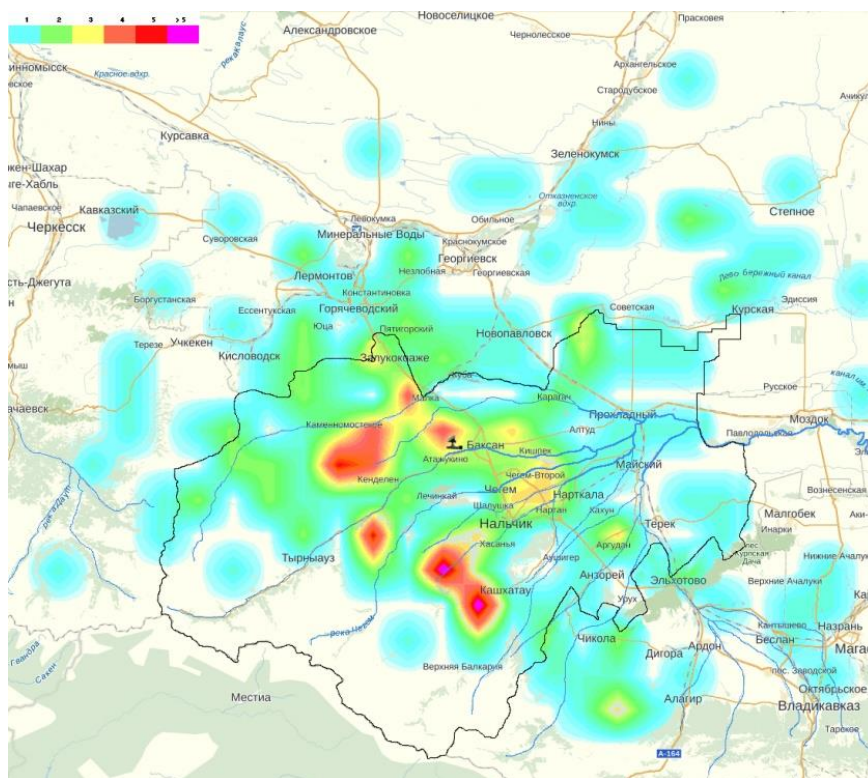


Рис. 13. Карта района появления первого радиоэха градовых облаков.

Для зарождения града должны сочетаться одновременно несколько факторов. Развитию грозоградовых процессов способствует большая влажность в нижнем слое тропосферы, достаточный перегрев у земли, резкие температурные перепады по высотам, а также особенности рельефа, обуславливающие развитие орографических вертикальных движений. Поэтому научный интерес представляет выявление времени суток, в которое наиболее часто зарождаются градовые облака в том или ином регионе. Из диаграммы на рис.14 видно, что чаще всего это бывает с 14 до 19 ч, причем в 65 % случаев первое радиоэхо градовых облаков появляется в дневное время с 12 до 17 часов. На рис.15 представлена гистограмма распределения градовых ячеек по высотам мест их зарождения.

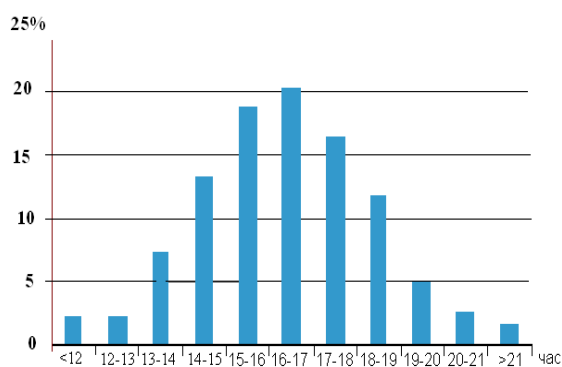


Рис. 14. Время появления первого радиоэха градового облака

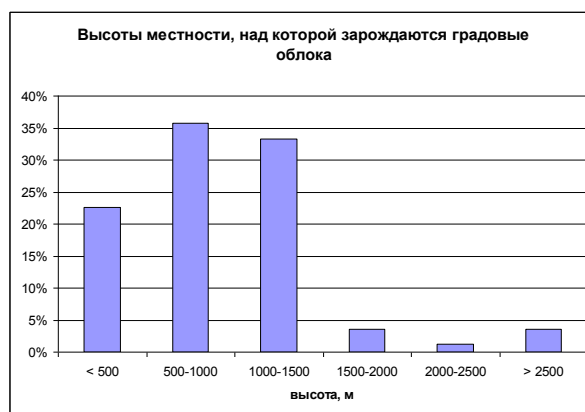


Рис. 15. Высота мест зарождения градовых ячеек.

На увеличение или уменьшение числа случаев выпадения града большое влияние оказывает не только высота места, возвышенности и горы, но и их расположение относительно воздушных потоков. В предгорных и горных районах орографический эффект усиливается, так как развитие восходящих движений перед препятствием создает динамический импульс для развития конвективной облачности.

Анализ рис. 15 показывает, что с ростом высоты места растет вероятность зарождения градовых облаков. Это происходит до уровня порядка 1000 м. Далее наблюдается падение вероятности появления первого радиоэха с ростом высоты до 2500 м. Далее наблюдается некоторое увеличение вероятности появления первого радиоэха. Средняя высота зарождения первого радиоэха 930 м.

Большая часть (почти 77%) всех градовых облаков зарождаются над территорией с высотой до 1500 м над уровнем моря.

В табл. 2 представлены наиболее вероятные значения некоторых параметров градовых ячеек.

Таблица 2

**Наиболее вероятные значения некоторых параметров градовых ячеек**

Наименование параметра	Миним. значение	Макс. значение	Среднее значение	Станд. отклон.	Интервал значений	Вероятность попадания в интервал, %
Время появления первого радиоэха, ч	0	24	16,5	4,09	12-17	65
Высота места зарождения ячейки, м	200	3100	980	560	200-1500	92
Скорость перемещения ячейки, км/ч	4	98	20,5	14,1	5-30	80
Направление перемещения ячейки, град	0	360	229	91,9	181-360	80
Расстояние перемещения, км	6	250	41	36	5-90	90
Время жизни градовой ячейки, мин	20	310	113	40	0,5 -3 ч	90
Время достижения градового состояния, мин	13	70	23,6	11,2	13-51	90
Высота верхней границы, км	6,2	14,9	11,1	1,7	8,0 -13,5	90
Объем области локализации града, км <sup>3</sup>	11	450	135,8	127,8	50 - 250	57
Площадь выпадения града, км <sup>2</sup>	4	93	23,6	20,1	4 -40	85
Время выпадения града, мин	0	154	45	37	0-90	90

В этом отношении чрезвычайно показательными могут быть сравнения для территории КБР и Краснодарского края. Как известно, разнообразный и сложный рельеф рассматриваемых регионов, перепады высот от уровня моря до 3000 м и выше, разнообразный характер подстилающей поверхности (от равнин и пустынь до вечных ледников), различная ориентация горных хребтов по отношению к господствующим потокам влажных воздушных масс создают многообразие в распределении градовых явлений и их интенсивности. Однако похожие орographicские признаки рельефа и однородный характер подстилающей поверхности в разных районах могут создавать там и общие черты в закономерностях развития грозоградовой облачности.

Для сравнения был проведен анализ динамических характеристик отдельных градовых ячеек в Краснодарском крае за 2011-2015 годы (табл. 3).

**Динамические характеристики отдельных градовых ячеек  
в Краснодарском крае за 2011-2015 годы**

	Среднее значение	Станд. отклонение	Интервал значений	Вероятность попадания в интервал, %
Скорость перемещения ячейки, км/ч	26,8	17,5	5-40	83
Направление перемещения ячейки, град.	220	62,1	181-360	83
Расстояние перемещения, км	52	47,1	5-96	86
Время жизни градовой ячейки, мин	110	54	0,5-2,5 ч	92

Сравнение данных таблиц 2 и 3 показывает:

- средняя скорость перемещения отдельных ячеек на 30% выше для Краснодарского края;
- среднее расстояние перемещения отдельных ячеек на 27% длиннее для Краснодарского края;
- для двух рассмотренных территорий среднее направление перемещения и время жизни отдельных ячеек практически совпадают.

Сравнивая результаты исследования направлений перемещения ячеек для двух рассматриваемых территорий, можно сделать вывод, что последние годы наблюдений выросло количество градовых ячеек с восточным перемещением. Особенно это заметно по Краснодарскому краю, где 30% всех ячеек имели восточное направление и в 2010, и в 2011 году.

Возможности использования радиолокатора для измерения структуры облаков и осадков обосновываются в работах [8-10]. В условиях неавтоматизированных наблюдений за быстро изменяющимися процессами в конвективных облаках оператор МРЛ получал минимум информации, недостаточной для определения микроструктуры града. Кроме того, определение размера града и его концентрации возможно лишь при использовании двухволновых методов с корректным учетом ослабления электромагнитного излучения в облаках и осадках. Эти недостатки могут быть устранены при полной автоматизации радиолокационных метеорологических наблюдений.

При помощи радиолокационных автоматизированных методов измерения имеется возможность непосредственно измерять отражаемость осадков в плоскости горизонтальных и вертикальных сечений, получать поля микрофизических параметров града и их изменчивость во времени и пространстве.

Методологические аспекты микрофизических исследований града радиолокационным методом изложены в ряде работ [4, 8,10,12].

Далее приводятся распределения некоторых микрофизических параметров града, полученные в зоне его роста в период максимального развития конвективных ячеек.

На рис. 16 представлена диаграмма повторяемости радиолокационной отражаемости на двух длинах волн -  $Z_{10}$  и  $Z_{3,2}$ . Эти данные получены в период максимального развития градовых ячеек. На рис.17 представлена диаграмма, описывающая повторяемость среднекубического диаметра града, определявшегося в конвективной ячейке в зоне его роста.

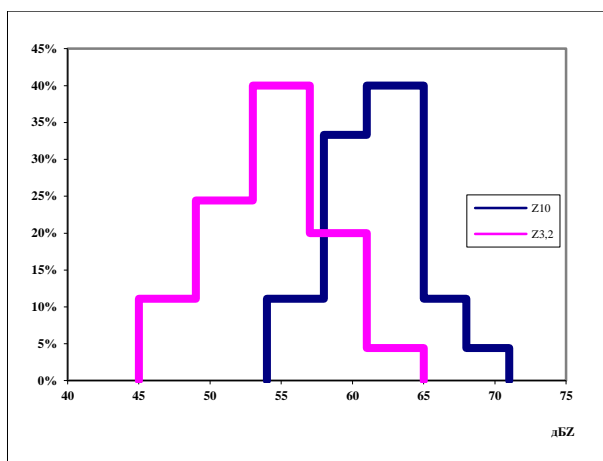


Рис. 16. Повторяемость значений отражаемости  $Z_{10}$  и  $Z_{3,2}$  в градовых ячейках в период их максимального развития

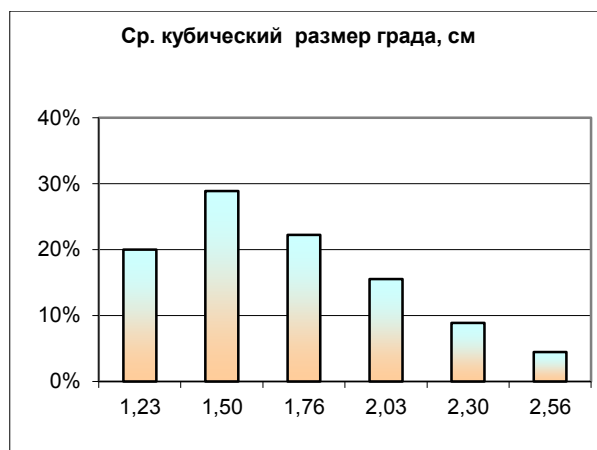


Рис. 17. Повторяемости значений максимального размера градовых частиц.

Анализ рис. 16 показывает, что для градовых ячеек в период их максимального развития характерно следующее:

- разброс значений  $Z_{3,2}$  происходит в пределах 45÷65 дБZ со средним значением 56,1, стандартное отклонение  $\sigma = 5,13$ ;
- отражаемость  $Z_{10}$  изменяется в пределах 53-72 дБZ со средним значением 61,7 стандартное отклонение  $\sigma = 5,03$ ;
- превышение  $Z_{10}$  относительно  $Z_{3,2}$  в среднем составляет 4-7 дБZ.

Анализ, проведенный по данным радиолокационных измерений, показал, что почти в 80% случаев в облаке отмечался мелкий град с максимальным размером до 2,0 см.

Важной характеристикой градовых осадков является концентрация градин, которая вместе с их размером напрямую связана с ущербом от градобитий. Известно, что концентрация градовых частиц колеблется в довольно широких пределах – от десятых долей единицы до нескольких десятков на кубический метр.



На рис.18 представлена диаграмма, описывающая повторяемость величин концентрации градин в конвективных ячейках. Из рис.18 видно, что в период формирования града в градовом очаге в 25 % случаев концентрация градовых частиц меньше 1,0 градины на м<sup>3</sup>, в 8% случаев – больше 10 градин на м<sup>3</sup>. В среднем за все процессы концентрация составила 3,3 градины на м<sup>3</sup>.

Размер градовых частиц и их концентрация определяют поток кинетической энергии выпадающего града. По этому комплексному параметру можно характеризовать интенсивность отдельных градовых процессов и весь сезон в целом. На основании анализа рис.19, на котором представлена диаграмма повторяемости величины потока кинетической энергии града  $\dot{E}$ , можно видеть, что почти 90% градовых ячеек давали град с кинетической энергией менее 3,5 Дж/(м<sup>2</sup>с), что соответствует граду малой и средней интенсивности. Однако анализ также показывает наличие (4,5 %) в сезонах годов очень интенсивных градовых процессов с  $\dot{E} > 4,6$  Дж/(м<sup>2</sup>с). Это подтверждает данные работы [7], в которой градовые процессы с потоком кинетической энергии 5,0 и более Дж/(м<sup>2</sup>с) относят к весьма разрушительным. Такие процессы происходят довольно редко, обычно не более чем в 2-3 % случаев за сезон.

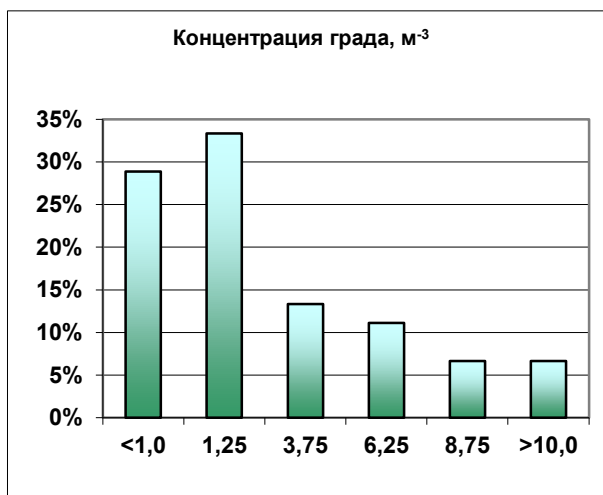


Рис. 18. Повторяемость концентрации градовых частиц в облаке

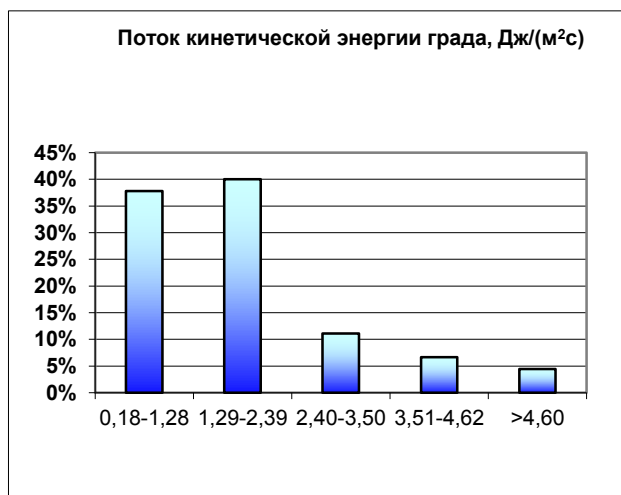


Рис.19. Повторяемость величин потока кинетической энергии выпадающего града.

## Выводы

Представлены результаты многолетних радиолокационных наблюдений за градовыми облаками над территорией центральной части Северного Кавказа. Наблюдения проводились на научно-исследовательском полигоне Высокогорного геофизического института на двухволновом метеорадиолокаторе МРЛ-5.

В процессе анализа осуществлялась паспортизация градовых облаков и осадков и сопутствующей синоптической обстановки. Полученная информация заносилась в

соответствующие таблицы базы данных (БД). При этом была разработана методика использования базы радиолокационных и синоптических данных для проведения кабинетных исследований градовых облаков. В результате были получены распределения основных параметров облаков, дающих град, синоптических и аэрологических характеристик в дни с градом. Полученные в работе результаты отражают характер природной изменчивости в формировании и развитии отдельных градовых ячеек, определяют области вариации их основных характеристик. Результаты могут быть использованы в оперативной работе по засеву градовых облаков, при разработке методов сверхсрочного прогноза градовой активности, а также при сопоставительном анализе результатов численного моделирования градовых облаков с данными экспериментальных исследований.

### ***Список литературы***

1. Бареева М.В., Газаева З.А., Макитов В.С. Характерные траектории суперячейковых градовых процессов на Северном Кавказе // Тр. ВГИ. 1999. Вып. 90. С.80-95.
2. Газаева З.А., Макитов В.С. Распределение траекторий перемещения многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе // Тр. ВГИ. 1991. Вып. 80. С.93-99.
3. Инюхин В.С. База радиолокационных данных // Труды ВГИ. 2014. Вып. 99. С. 52-60.
4. Абшаев М.Т. Комплексные радиолокационные исследования структуры и динамики развития градовых облаков. В книге "Пятое Всесоюзное совещание по радиометеорологии". – М.: Гидрометеиздат, 1981. – С. 94-100.
5. Абшаев М.Т. Структура и динамика развития грозоградовых процессов Северного Кавказа. В книге "Радиометеорология. Труды VI Всесоюзного совещания". – Л.: Гидрометеиздат, 1984. С. 109-115.
6. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. – М.: Гидрометеиздат, 1991. – 425 с.
7. Бареева М. В., Макитов В. С. Сопоставительный анализ аэросиноптических и термодинамических условий формирования и развития градовых облаков в различных физико-географических регионах // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. С. 322–337.
8. Абшаев М. Т., Атабиев М. Д., Правосудов А. В. Методика и аппаратура радиолокационных исследований строения динамики и микроструктуры грозоградовых процессов // Труды 4-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. – М.: Гидрометеиздат, 1978.С. 74–81.
9. Абшаев М.Т., Дадали Ю.А., Мальбахова Н.М., Правосудов А.В., Чикун В.Н., Шапошников В.В. К вопросу пространственно-временного распределения параметров микроструктуры и влажности кучево-дождевых облаков // Тр. ВГИ. 1975. Вып.33. С.67-80.

10. Абшаев М. Т., Атабиев М. Д., Инюхин В. С., Капитанников А. В., Тапасханов В. О. Алгоритмы автоматизированного радиолокационного измерения полей микрофизических характеристик градовых осадков // Труды ВГИ. 1990. Вып. 77. С. 86–105.
11. Абшаев М. Т. Структура и динамика развития грозоградовых процессов Северного Кавказа // Труды ВГИ. 1984. Вып 53. С. 6-22.
12. Инюхин В.С., Макитов В.С. Возможности использования одноволнового радиолокатора для оценки параметров микроструктуры градовых облаков Материалы Международной научной конференции с элементами научной школы (Ставрополь 23-26 сентября 2013 года). С.321-328.
13. Инюхин В.С. Повторяемость некоторых микрофизических параметров града в сезонах 2009-2010 гг. на территории КБР. Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 24-28 октября 2011г. с.192-199.
14. Инюхин В.С., Малкаров А.С., Чередник Е.А. Динамические характеристики градовых процессов // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик: ООО «Печатный двор». 2013. С. 199-207.
15. Инюхин В.С., Кущев С.А., Макитов В.С., Чередник Е.А. Динамические характеристики отдельных градовых ячеек центральной части Северного Кавказа по данным радиолокационных наблюдений // Труды ВГИ. 2014. Вып. 99. С. 41-51.
16. Справочник по климату СССР вып.13. ч.5. Л: Гидрометеиздат, 1968. 363 с.

## **ЗАМОРОЗКИ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ СВЧ-РАДИОМЕТРА**

**Постельная А.Е.<sup>1</sup>, Абшаев А.М.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь

<sup>2</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

### **Введение**

Весенние и осенние заморозки наносят существенный ущерб сельскому хозяйству во многих регионах мира. Большие потери они наносят агропромышленному производству и в Российской Федерации. Только на территории Северного Кавказа по данным МЧС ежегодно отмечается 4 – 5 случаев чрезвычайных ситуаций (ЧС) регионального значения, связанных с

заморозками, а также множество случаев локальных заморозков, среднегодовой ущерб от которых достигает 2,4 миллиарда руб./год. Аналогичная картина наблюдается во многих регионах мира. В Крыму среднегодовой ущерб от заморозков в 1999 – 2004 гг. составил 5,5 млн. долларов, особенно большой ущерб (10,9 млн. долларов) был нанесен в апреле 2004 г. В провинции Мендоса Аргентины ежегодно погибает от весенних заморозков от 10 до 35% урожая и ущерб может превышать сто миллионов долларов США.

В связи с этим развитие методов прогноза и регистрации заморозков имеет важную экономическую значимость. Особую актуальность эта проблема приобретает в связи с интенсивным развитием современного высокоурожайного садоводства, виноградарства и овощеводства.

Нашей задачей является исследование параметров атмосферы, при которых могут формироваться заморозки. Источником данных в нашем анализе является многоволновый пассивный СВЧ-радиометр RPG НАТPRO, установленный на здании ФГБУ «ВГИ» в г. Нальчик. В данной статье описываются основные элементы построенного программно-технического комплекса, предназначенного для проведения исследований. С этой целью планируется провести анализ физических и метеорологических условий формирования заморозков различных типов; провести исследования частоты повторения и ущерба от заморозков на территории Северного Кавказа; выработать рекомендации для разработки методов защиты от радиационных заморозков; выявить влияние влажности воздуха и скорости ветра на возникновение заморозков.

### **Заморозки и их классификация**

Под заморозком обычно понимают понижение температуры ниже 0°C на поверхности почвы и травостоя во время вегетационного периода, на фоне положительных среднесуточных температур. Такое определение заморозка соответствует согласованному мнению метеорологов и климатологов.

Заморозки, наблюдающиеся весной и осенью в зоне умеренного климата - нормальное климатическое явление. Опасны для сельскохозяйственных культур только поздние весенние и ранние осенние заморозки, совпадающие с вегетационным периодом сельскохозяйственных культур [2].

Классификация заморозков обычно осуществляется по их происхождению (адвективные, радиационные и смешанные), по визуальным проявлениям (белые и черные), по времени года, интенсивности, масштабу и продолжительности.

*Адвективные заморозки* связаны с вторжением холодного воздуха и характеризуются наличием ветра со скоростью более 4 м/с и отрицательным градиентом температуры с высотой, без температурной инверсии. Площади их воздействия обширны. Облачность не влияет

на температуру, которая изменяется во времени. Адвективные заморозки могут наблюдаться и днем и в ночное время, хотя днем при отсутствии облачности приток солнечного излучения смягчает такие заморозки.

*Радиационные заморозки* связаны с радиационным выхолаживанием поверхности почвы в течение ночи за счет теплового излучения, которому способствует безоблачное небо и слабый ветер или его отсутствие. При отсутствии облачности и тумана восходящее тепловое излучение в инфракрасном диапазоне волн уходит в космическое пространство и обуславливает нарастающее в течение ночи охлаждение поверхности почвы и приземного воздуха. Формируется приземная инверсия температуры, которая характеризуется тем, что температура в приземном слое воздуха (до высоты несколько метров, а иногда десятков метров) на несколько градусов ниже, чем температура над слоем инверсии. Если перед заходом солнца температура у поверхности земли была не более  $7-8^{\circ}\text{C}$ , то в течение ночи она может снизиться до  $-3-8^{\circ}\text{C}$ .

Радиационные заморозки формируются в областях повышенного давления и антициклонах в безветренную и безоблачную ночь, когда тепловое излучение поверхности земли велико, а турбулентность воздуха мала.

*Смешанные заморозки* связаны с вторжением холодного воздуха и одновременным действием радиационного выхолаживания почвы.

По времени года заморозки подразделяются на два вида: *ранние весенние* и *поздние осенние*. По интенсивности заморозки делятся на *слабые* (при понижении температуры почвы до  $t = -1 / -2^{\circ}\text{C}$ ), *сильные* (при  $t = -3 / -4^{\circ}$ ) и *очень сильные* (при  $t = -5 / -8^{\circ}\text{C}$ ).

По продолжительности действия заморозки бывают *кратковременные*, *средней продолжительности* и *длительные*. По масштабу явления можно выделить также заморозки *крупномасштабные*, действующие в масштабе региона и приводящие к чрезвычайным ситуациям (ЧС) и *локальные*, действующие на малых территориях.

### **Условия формирования заморозков**

Считается, что имеет место заморозок, если температура воздуха на высоте 1,5 метров над уровнем земли равна  $0^{\circ}\text{C}$ . Этот способ определения явления заморозка был согласован метеорологами и климатологами, положив конец разногласиям, существовавшим в определении данного явления. Однако с точки зрения сельскохозяйственной климатологии нельзя считать заморозком наличие какой-то определенной температуры ввиду того, что существуют растения, которые чувствительны к низким температурам, даже если они не достигают  $0^{\circ}\text{C}$ , пример тому некоторые тропические растения, такие как кофе, орхидея, какао и др.

## Традиционные методы прогноза и предупреждения о заморозках

Для своевременного и эффективного выполнения противозаморозковых мероприятий важны контроль и качественный прогноз заморозков, изучение характеристик особенностей формирования заморозков в различных регионах и чувствительности разных культур к понижению температуры и т.д. Один из методов определения вероятности заморозка изложен в [1] и основан на данных о суточном ходе температуры и учете ее неперiodических понижений. Интенсивность заморозков зависит от влажности воздуха, характера почвы, растительного покрова, рельефа местности, облачности и ветра. Все эти факторы влияют на тепловое излучение почвы и, следовательно, и на степень охлаждения поверхности почвы и приземного слоя воздуха. Заморозки обычно наблюдаются в предутренние часы перед восходом солнца, когда температура воздуха и почвы достигает минимума. Заморозки чаще образуются в следующих условиях: при безоблачной и безветренной ночи; при повышении атмосферного давления и прояснении пасмурной холодной погоды к вечеру или ночи; они чаще образуются и быстрее развиваются в сухом воздухе; если в 21<sup>00</sup> точка росы ниже 2°C, то при безоблачном небе и безветрии следует ждать ночного мороза; они чаще наблюдаются в низинах, чем на возвышенностях и их склонах; на сухой и рыхлой почве заморозок более вероятен и опасен, чем на влажной и плотной.

Вероятность заморозка уменьшается при повышении влажности воздуха и атмосферного давления, появлении росы или выпадении инея, образовании тумана с вечера или в начале ночи, наличии ветра, перемешивающего приземный воздух, появлении облачности к ночи и пасмурной погоде.

В Российской Федерации крупномасштабные и мезомасштабные прогнозы заморозков реализуются прогностическими подразделениями Росгидромета. В некоторых районах прогноз составляется на основе таблицы температуры сухого и «смоченного» термометра (см. рис. 1).

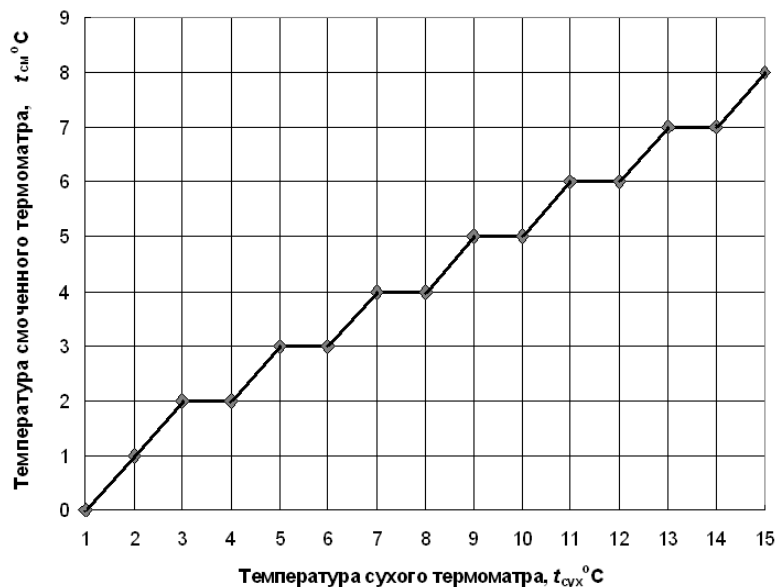


Рис. 1. График прогнозирования заморозков по показаниям «сухого» и «смоченного» термометров.

Степень возможного ночного выхолаживания до заморозков прогнозируется многими способами. Одним из таких способов является способ П.И. Броунова, основанный на данных температуры воздуха в тени в  $13^{00}$  и разности температуры воздуха в  $13^{00}$  и  $21^{00}$  (см. рис. 2).

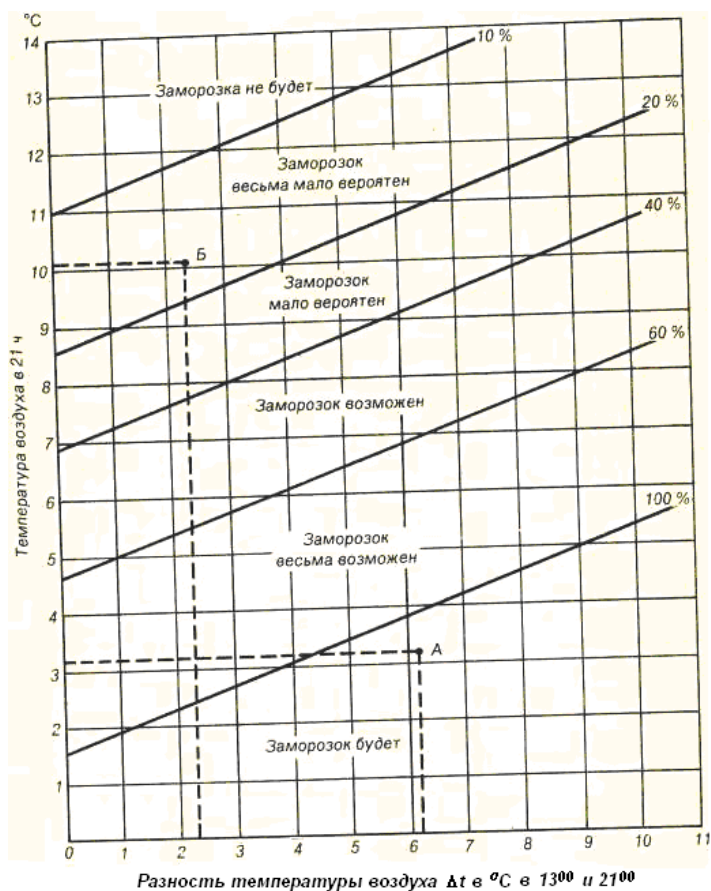


Рис. 2. График для определения вероятности заморозка по температуре воздуха в  $21^{00}$  и разности температур в  $13^{00}$  и  $21^{00}$ .

Опасность заморозка определяется не только наличием соответствующего понижения температуры ниже 0°C, но и состоянием сельскохозяйственных культур. Опасные заморозки возникают, как правило, позднее средней даты заморозка по району, в годы с относительно теплой, ранней весной. Длительность периода между самым ранним и самым поздним заморозком различна в разных климатических условиях. Длительность наиболее поздних заморозков невелика, обычно не более 3 – 4 часов.

Дальнейшее изучение проблемы опасных заморозков и обоснование мер борьбы с ними в разных климатических районах должно идти по пути изучения физиологического действия на растение кратковременного заморозка и предшествовавшей ему погоды в конкретных условиях разных климатов (морской, континентальный), изучения теплового баланса растения во время заморозка и детального изучения механизма возникновения опасного заморозка и погодных условий, его сопровождающих.

Деятельность службы прогнозов заморозков является важной частью программы защиты от них. Целью прогнозов является заблаговременное оповещение о вероятности наступления заморозков, для принятия необходимых мер защиты, сведя к минимуму последствия воздействия на них низких температур. Прогноз вырабатывается, в основном, для базовых станций, как правило, расположенных в самых холодных районах.

В целом можно сделать вывод о том, что объем получаемых в настоящее время сведений о заморозках не достаточен для оценки заморозковой опасности территорий, обоснования размещения теплолюбивых растений, а также для установления сроков сева и уборки сельскохозяйственных культур, разработки методов защиты растений от этого опасного явления. Необходимо дальнейшее развитие средств и методов измерений состояния атмосферы и нахождение новых критериев прогнозирования заморозков. Один из таких новейших подходов кратко изложен в следующем разделе.

### **Многоканальный СВЧ-радиометр RPG-НАТPRO**

Профайлер RPG-НАТPRO (рис. 3) представляет собой пассивный микроволновый радиометр, предназначенный для измерения множества атмосферных параметров (влажность, температура, приведенная водность и др.) с высоким временным и пространственным разрешением. Принцип работы основан на последовательной обработке данных 14 независимых каналов. В отличие от других систем RPG-НАТPRO имеет возможность представления быстрого анализа капельного водосодержания LWP (Liquid Water Path) с частотой 1 секунда и низким уровнем шумов < 2 г/м<sup>2</sup>. В то же время, прибор измеряет профили температуры и влажности всей тропосферы (до 10 км).



Кроме того, для достижения наибольшей точности и вертикального разрешения, прибор поддерживает два разных режима сканирования. Первый режим предназначен для измерения профиля температуры во всей тропосфере ( $< 10000$  м) с вертикальным разрешением 150 – 250 м, второй режим предназначен для измерения пограничного слоя ( $< 1000$  м) с вертикальным разрешением - 50 м. Оба режима относятся к методу сканирования в Зените.



Рис. 3. Внешний вид СВЧ-радиометра RPG-HATPRO.

Высокое разрешение в пограничном слое атмосферы достаточно для идентификации слоев температурной инверсии, которые формируются обычно в этом слое.

В режиме наблюдения в Зените радиометр позволяет измерять содержание водяного пара и кислорода (рис. 4) в вертикальном направлении. Профили атмосферных параметров таких как жидко-капельная водность (LWP), интегрированный по высоте водяной пар (IWV) и абсолютная/относительная влажность вычисляются на основе формы кривой водяного пара в канале диапазона 31.4 ГГц. Кривая содержания кислорода используется только для определения профиля температуры воздуха в тропосфере. Полосы частот, отмеченные синим цветом на рисунке 4, используются радиометрами RPG для получения LWP, IWV, профиля влажности и температуры (вся тропосфера и пограничный слой).

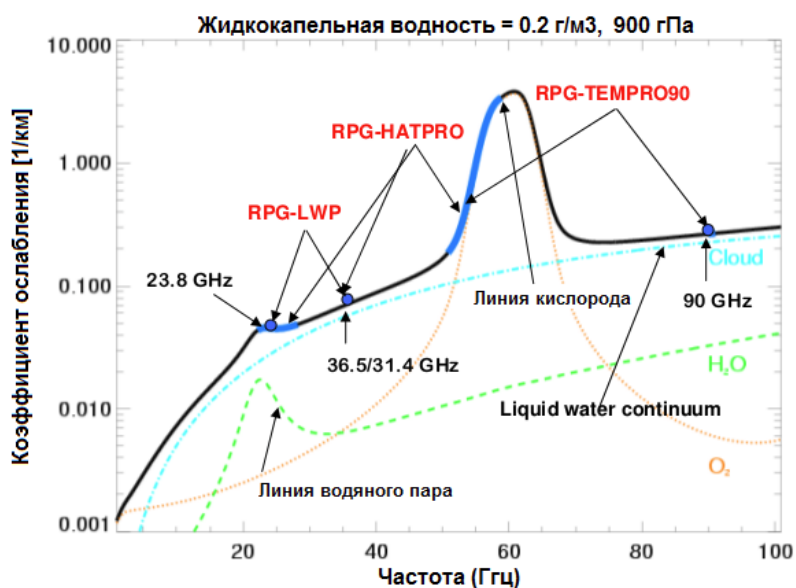


Рис. 4. Излучение жидкой воды, водяного пара и кислорода в атмосфере.

Радиометр RPG-НАТПРО включает в себя 7 каналов для определения кривой распределения по высоте водяного пара и 7 каналов для определения кривой распределения кислорода. Частоты  $F_c$  (ГГц) и полосы пропускания  $B$  (МГц) каналов приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Центральные частоты каналов радиометра RPG-НАТПРО и их полосы пропускания**

<b><math>F_c</math> (ГГц)</b>	22.24	23.04	23.84	25.44	26.24	27.84	31.4
<b><math>B</math> (МГц)</b>	230	230	230	230	230	230	230
<b><math>F_c</math> (ГГц)</b>	51.26	52.28	53.86	54.94	56.66	57.3	58.0
<b><math>B</math> (МГц)</b>	230	230	230	230	600	1000	2000

**Обработка данных СВЧ-радиометра**

Электронный архив измерений радиометра RPG-НАТПРО, установленного на крыше здания ВГИ (г. Нальчик), начинает отсчет от марта 2015 г., однако, в связи с отсутствием технического обслуживания в некоторые месяцы прибор не работал. Непрерывный архив данных стал накапливаться с 2016 г. В июне 2017 г. специалистами института впервые после инсталляции прибора была проведена абсолютная калибровка приемного тракта жидким азотом чистотой не ниже 99.9%. Следует отметить, что абсолютная калибровка рекомендуется проводиться раз в полгода. Несмотря на это, нам представляется, что качество измерений в нижнем приземном слое высотой 200 - 300 м в периоды отсутствия должной калибровки, должно быть на удовлетворительном уровне для нашего анализа.

Для обработки данных радиометра нами была разработана программа для ЭВМ, позволяющая открывать метеорологические файлы, непрерывно формируемые прибором (таблица 2).

Файлы, созданные СВЧ - радиометром RPG-НАТПРО, имеют следующие расширения NRC-Files (\*.NRC), Humidity Profile Chart (without RH) [3] и т.д.

Таблица 2

**Выходные файлы измерений СВЧ-радиометра**

<b>№</b>	<b>Наименование файла</b>	<b>Тип данных</b>
1	LWP-Files (*.LWP)	Жидко-капельная водность
2	IWV-Files (*.IWV)	Интегральное водосодержание
3	ATN-Files (*.ATN)	Ослабление сигнала в атмосфере
4	BRT-Files (*.BRT)	Радиояркостьная температура
5	MET-Files (*.MET)	Метеорологические датчики
6	OLC-Files (*.OLC)	Кислород
7	TPC-Files (*.TPC)	Профиль температуры 0 – 10 км
8	TPB-Files (*.TPB)	Профиль температуры 0 – 2 км
9	WVL-Files (*.WVL)	Водяной пар

Для исследования заморозков нам необходимы данные, зашифрованные в файлах с расширением .MET. Наша программа позволяет открывать такие файлы в следующем виде:

Время	Давление, мбар	Температура, К	Влажность, %	Скорость ветра, км	Направление ветр	
01.07.2015 06:00:00	956.1	291.46	79.0234	4.1	3	0
01.07.2015 06:00:01	956.1	291.46	79.0367	4.2	3	0
01.07.2015 06:00:02	956.1	291.46	79.0367	4.2	3	0
01.07.2015 06:00:03	956.1	291.46	79.0367	4.2	3	0
01.07.2015 06:00:04	956.1	291.463	79.0501	4.7	4	0
01.07.2015 06:00:05	956.1	291.463	79.0501	4.7	4	0
01.07.2015 06:00:06	956.1	291.463	79.0501	4.7	4	0
01.07.2015 06:00:07	956.1	291.463	79.0501	4.7	4	0
01.07.2015 06:00:08	956.1	291.467	79.0567	5.1	8	0
01.07.2015 06:00:09	956.1	291.467	79.0567	5.1	8	0
01.07.2015 06:00:10	956.1	291.467	79.0567	5.1	8	0

Для нахождения выборки дней с вероятным заморозком из общей непрерывной базы измерений мы разработали упрощенный алгоритм. Считалось, что в заданную ночь имелась вероятность возникновения заморозка, если в предшествующий полдень, температура воздуха у Земли была положительной + (5 — 10)°С, а в 5 часов утра по местному времени — отрицательной. Выбрав ограниченное число дней, удовлетворяющих такому условию, мы планируем детально рассмотреть все имеющиеся параметры, измеряемые радиометром, в том числе: профиль температуры и влажности, вертикально интегрированное содержание водяного пара, скорость ветра, температуру и давление у земли, относительную влажность. При этом будет рассматриваться как сам период возникновения заморозка, так и 12-ти часовой период, предшествующий формированию заморозка. Также будет анализироваться длительность заморозка, и ход параметров атмосферы, регистрируемых с помощью радиометра и метеостанции, входящей в ее состав. Анализ должен расширить наши знания о заморозках и позволить точнее определять условия, при которых возможно формирование заморозка. В дальнейшем нам предстоит обширное исследование по анализу и систематизации полученных метеорологических данных СВЧ - радиометра RPG-НАТPRO для определения причин и условий возникновения заморозков, что в дальнейшем поможет определить наиболее рациональные способы защиты от них.

### **Список литературы**

1. Гольцберг И.А. Климатическая характеристика заморозков и методы борьбы с ними в СССР // Тр. ГГО. – Вып. 17 (79). – 1949. – С.

2. Поякова Л.С., Кашарин Д.В. Метеорология и климатология Учебное пособие (для студентов специальностей 320500, 320600, 311600) / Л.С. Поякова, Д.В. Кашарин – Новочеркасск, - НГМА, 2004, с. 107.

3. Instrument Operation and Software Guide Operation Principles and Software Description for RPG standard single polarization radiometers (G4 series) - Applicable for HATPRO, LHATPRO, TEMPRO, HUMPRO, LHUMPRO, LWP, LWP-U90, LWP-U72-82, LWP-90-150, Tau-225, Tau-225-350

## СОЗДАНИЕ ПРОСВЕТЛЕНИЯ В ОБЛАЧНОЙ СРЕДЕ

**Калов Х.М., Калов Р.Х.**

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

### **Введение**

В работе для создания просветления в облачной среде, рассеяния теплых туманов используется тепловой метод, основанный на сжигании высококалорийных веществ в режиме детонации с образованием воздушных волн сжатия, распространяющихся со скоростями 450-600 м·с<sup>-1</sup>. Распространение этих волн в облачной среде, при котором возникают скачки давления и температуры на фронте волны, а также излучение тепла при сгорании веществ, способствует образованию зоны просветления в тумане.

Данная работа посвящена расчету линейных размеров зон просветления, образующихся за счет трансформации спектра размеров облачных капель и их испарения на фронте волны, а также испарения капель под действием поля теплового излучения. 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. Возможность полного испарения облачных капель в ударной волне определяется двумя факторами - величиной избыточной температуры  $\Delta T$  в зоне взрыва и повышения давления в ударной волне на  $\Delta P$ . При удалении от центра взрыва амплитуда ударной волны быстро уменьшается, ударная волна становится слабой. На этой стадии зависимость между приращениями атмосферного давления  $\Delta P$  и температуры  $\Delta T$  выражается формулой

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{\rho_0 C_p}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  - плотность невозмущенного воздуха,  $C_p$  - теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

В таблице представлены значения  $\Delta P$  и  $\Delta T$  на различных расстояниях  $R$  от центра взрыва и при различных значениях веса заряда  $q$ , при  $\rho_0 = 1 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ ,  $C_p = 1 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$ . Нижняя строка в каждой колонке относится к взрыву на поверхности грунта.

Таблица

**Значения приращения атмосферного давления  $\Delta P$  и температуры  $\Delta T$  на различных расстояниях  $R$  от центра взрыва и при различных значениях веса заряда  $q$**

$R, \text{ м}$		50	100	150	200
$q = 10 \text{ кг}$	$\Delta P, \text{ атм.}$	0,042	0,020	0,012	0,009
		0,057	0,026	0,017	0,012
	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	4,20	2,0	1,2	0,9
		5,70	2,6	1,7	1,2
$q = 50 \text{ кг}$	$\Delta P, \text{ атм.}$	0,078	0,040	0,021	0,018
		0,110	0,047	0,027	0,020
	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	7,8	4,0	2,1	1,8
		11,0	4,7	2,7	2,0
$q = 100 \text{ кг}$	$\Delta P, \text{ атм.}$	0,107	0,046	0,030	0,020
		0,150	0,062	0,038	0,034
	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	10,7	4,6	3,0	2,0
		15,0	6,2	3,8	3,4

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.

Эффект воздействия взрыва на облачную среду существенно может быть усилен путем добавления к заряду определенного количества таких веществ, которые не окисляются (не соединяются с кислородом) в процессе детонации. Перемешивание таких веществ с воздухом вызывает интенсивное догорание взрывных газов и к дополнительному выделению тепловой энергии. При определенных условиях такой процесс может привести к существенному увеличению радиуса  $R_k$  шарообразного объема, занимаемого взрывными газами (до 10... 15 м), и к повышению температуры до  $2500^\circ\text{C}$  и более [1]. При таких температурах и объемах раскаленная газовая масса излучает как абсолютно черное тело, т.е. энергия, излучаемая единичной поверхностью газового шара, определяется формулой  $W = \delta T^4$ , где  $T$  - абсолютная температура поверхности взрывных газов;  $\delta$  - постоянная Стефана-Больцмана. При температурах 2000-3000°K почти вся энергия излучения приходится на видимые и инфракрасные лучи, для которых холодный воздух является совершенно прозрачным. Мощность излучения, падающего на каплю радиуса  $r$ , находящуюся на расстоянии  $R$  от центра взрыва, равна  $W \left( \frac{R_k}{R} \right)^2 \pi r^2$ . Если обозначить через  $\chi$  долю этой энергии, которая поглощается каплей, то уравнение, описывающее испарение капли, может быть записано в виде

$$L \frac{dm}{dt} = W \left( \frac{R}{R_k} \right)^2 \pi r^2 \chi, \quad (2)$$

где  $m$  - масса капли.

Время полного испарения капли определяется формулой

$$\tau = \frac{4 \rho_k r_0 L}{\chi W} \left( \frac{R}{R_k} \right)^2. \quad (3)$$

Из приведенных выше расчетов следует, что при взрыве заряда в слоистом облаке можно получить зону просветления с радиусами до 100 и более метров в зависимости от величины водности облака.

### **Выводы**

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 3,4°С соответственно). При слабых взрывах ( $q \leq 10$  кг) на поверхности земли испарение капель тумана происходит в объеме сферы радиусом до 50 м. А если взрыв производится на высоте 1 ÷ 2 м от поверхности земли, то эффект усиливается и при этом существенное уменьшение водности тумана и образование просветления в облачном образовании происходит в радиусе 100 и более метров.

При взрыве заряда возникает облако расширяющихся взрывных газов, тепловое излучение которого испаряет капельки облачного образования и создает зону просветления в тумане с радиусом до 100 и более метров при величине заряда  $q = 10$  кг.

### **Список литературы**

1. Калов Х.М., Калов Р.Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозоградные облака и туманы. – Нальчик: ООО «Полиграфсервис и Т», 2010. – 220 с.

**О РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ  
ПОСЛЕДСТВИЙ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МЕЗОМАСШТАБНЫХ  
КОНВЕКТИВНЫХ КОМПЛЕКСАХ**

**Стасенко В.Н.**

ФГБУ «НИЦ «Планета», г. Москва

**Введение**

Наблюдаемое увеличение числа экстремальных явлений погоды должно ускорить развитие автоматизированных систем прогнозирования опасных быстроразвивающихся явлений (ОЯ) и подготовки предупреждений о степени опасности. В Росгидромете приступили к разработке и внедрению автоматизированной системы управления сбором, обработкой и визуализацией данных наблюдений для Московского региона. КОС ВМО настойчиво рекомендует разрабатывать информационную продукцию, оценивающую не только риск появления ОЯ, но и величину ущерба. По существу речь идет о создании систем прогноза целого комплекса опасных явлений и предупреждения об ущербах для конкретных производств и служб [1].

**Основные методические вопросы**

Рассмотрим кратко существующие возможности решения такой задачи. Цифровой вид фактической и прогностической информации способствуют ее более углубленному изучению и тематической интерпретации. Здесь на первый план выдвигаются следующие научно-методические вопросы: детализированное описание физики и динамики причинно-следственных связей, ответственных за формирование и интенсивность ОЯ; выбор адекватных методов и средств получения и анализа данных, на базе которых возможно создание систем раннего обнаружения (СРО) ОЯ, экспертных и других систем оценки последствий.

Несмотря на совершенствование численных методов, СРО ОЯ и оценка возможного ущерба от них должны быть основаны на инструментальных методах наблюдений. Если степень неустойчивости атмосферы в целом по региону может быть предвычислена, то фактическая погода по территории прогноза (вид и интенсивность ОЯ) может значительно отличаться от параметров прогноза. Здесь присутствует ряд факторов, не учитываемых пока в численном моделировании. В частности, рельеф местности, характер подстилающего покрова влияют на вертикальный профиль атмосферных переменных и определяют параметры локальных циркуляций, про-

странственно-временной масштаб мощных конвективных облаков (МКО) и, следовательно, степень их опасности. Необходимы оперативные средства наблюдений, дающие точные и достоверные данные о степени опасности облаков на фоне общей тенденции ухудшения погоды в регионе.

Сегодня идее создания СРО в наибольшей степени соответствует технология АВ на грозоградовые процессы, в которой уже осуществляются идентификация объекта воздействия и определение его опасности. Эффективность воздействий на градовые процессы достигает 80-100%, что свидетельствует в целом о достоверности алгоритма оценки свойств МКО, времени появления и размера градových частиц в облаках, реализуемого в технологическом цикле ПГЗ. Следовательно, информационная часть технологии АВ может быть использована в качестве источника данных о естественном ходе развития ОЯ. Однако она должна быть существенно дополнена фактическими данными об ущербах от отдельных видов ОЯ.

Здесь имеются свои трудности. Поляризационные ДМРЛ, широкополосные грозорегистрационные системы (ГРС), многоволновые датчики на космических аппаратах (КА) дают возможность контролировать широкий спектр опасных явлений, вместе с тем, заранее предсказать какое ОЯ из всего набора неприятностей будет превалировать в объявленных штормовых условиях пока трудно. На начальном этапе построения СРО, экспертных и других систем оценки последствий необходим возможно более широкий спектр средств ДЗА и способов тематической интерпретации данных (собранных в одном месте), которые в автоматическом режиме смогут по разработанным (и проверенным) предикторам оценивать степень опасности и вероятный ущерб. Иными словами, необходимо теоретически и экспериментально обосновать предиктор того или иного ОЯ, оценить его заблаговременность с целью принятия своевременных мер защиты.

При этом очевидная проблема в обработке, связанная с отличающимся пространственно-временным масштабom данных разных датчиков, может быть преодолена при использовании численного моделирования, способного обрабатывать (подбирать аппроксимирующие функции) данные ДЗА. К ним относятся отражательные и излучательные характеристики грозоградových облаков, измеряемые МРЛ (X, C и S диапазонов), ГРС (УКВ и СДВ диапазонов), СВЧ радиометрами и КА, а именно: концентрация, агрегатный состав и спектр размеров частиц облаков и осадков; расположение, размер, величина и полярность зарядов в основных электро-активных зонах (ЭАЗ) облака и др. Поступающая непрерывно детализированная информация о местоположении, структуре каналов грозовых разрядов, величине и полярности протекающих токов, числе возвратных ударов во вспышках молний дает возможность наблюдать полную молниевую активность (ПМА) облаков – сумму разрядов на землю и внутриоблачных / межоблачных молний и сопоставлять ее с пространственно-временной структурой облаков, расположением зон осадков, их интенсивностью и др. Фактические данные о параметрах облачного поля, расположении и



ходе в нем грозовой активности позволяют изучать особенности циркуляции в мезомасштабе, влияние рельефа местности на ОЯ и др.

Реалистичность такого подхода может быть проверена на специальных полигонах в ходе сравнительных наблюдений за МКО с помощью многоволнового комплекса активно - пассивного зондирования и работающей в реальном масштабе времени 3-х мерной численной модели (ЧМ) с детализированным учетом гидротермодинамических, микрофизических и электрических процессов и представлением данных в единой с наблюдательными средствами системе координат.

### **Пути реализации**

В качестве примеров поэтапного решения поставленной задачи можно привести следующие реализованные в НИУ возможности:

1. В НИЦ «Планета» осуществляется комплексирование спутниковых данных об облачной атмосфере и информации о ПМА эксплуатируемой совместно с ВГИ многопунктной ГРС LS 8000. Количественные данные о ПМА, тесно связанной с интенсивностью и масштабом конвекции, способствуют разработке новых диагностических и прогностических признаков для идентификации МКО и связанных с ними ОЯ (град, избыточные осадки, интенсивные атмосферные вихри и шквалы). Изучение зарубежными коллегами соотношения внутриоблачных и наземных молний, числа, полярности и токовых характеристик возвратных ударов, местоположения и разветвленности каналов молний в облаках позволяет давать физическую трактовку причинно-следственных связей в МКО, прогнозировать степень опасности МКО и увеличивать заблаговременность оповещения о торнадо до 20-25 минут [2]. Резкое увеличение числа внутриоблачных разрядов (до 60 р/мин и более) указывает на возможность появления через 10-15 минут опасных для авиации шквалов [3]. Отмечается реверс полярности молнии с отрицательной на положительную в период формирования градовых частиц в облаке и обратно на отрицательную при их выпадении [4]. Эти работы целесообразно продолжить в наших физико-географических условиях.

2. В НИЦ «Планета» разработан новый подход к автоматизированной оценке вероятности гроз на основе спутниковых данных. Для распознавания гроз используются геостационарные КА Meteosat и MTSAT (Himawari) с разрешением от 3 до 5 км в подспутниковой точке. По значению радиационной температуры на верхней границе (ВГ) облаков в ИК диапазоне (10 - 11 мкм) оцениваются высота ВГ, средняя интенсивность осадков и ряд других метеорологических параметров атмосферы с использованием гидродинамической модели регионального прогноза Гидрометцентра России [5]. Использование непрерывных данных ГРС LS 8000 о грозах является необходимым условием правильной настройки эмпирических зависимостей в данной модели для определения вероятности грозы. Кроме того, непрерывная информация о вариациях ПМА может быть опорной для своевременного обнаружения последовательного развития отдельных КЯ, их

усиления или ослабления в мезомасштабных конвективных комплексах (МКК) в связи с тем, что спутниковые наблюдения являются дискретными во времени и пространстве. Мы располагаем возможностью отработки методов идентификации зон грозовой активности в местах со слабым (или отсутствующим) радиолокационным прикрытием.

3. В Высокотемпературном геофизическом институте на основе разработанной трехмерной нестационарной модели конвективного облака с детальным учетом гидротермодинамических, микрофизических и электрических процессов проводятся расчеты объемных зарядов в облаке, потенциала электростатического поля, создаваемого этими зарядами, а также горизонтальных и вертикальных составляющих напряженности поля облака [6]. Здесь важно достичь сходимости результатов о начале грозы и повторяемости молний типа О-З с аналогичными оценками LS 8000.

Для сопоставления с данными радиолокационных наблюдений в модели с помощью подобранных функций распределения по размерам капель и ледяных частиц рассчитывается отражаемость облака на длинах волн МРЛ (3,2 и 10 см) и реализуется трехмерная визуализация данных моделирования, адаптированная для сопоставления с радиолокационной картиной облаков. Важным элементом правдоподобности ЧМ является сходство реального и моделируемого облаков.

Следующим шагом в численном моделировании МКО должна стать локализация основных ЭАЗ при данном вертикальном профиле атмосферных переменных, включая скорость и направление ветра. Кроме того, необходимо реалистичное моделирование процесса формирования МКК, так как подавляющее большинство МКО существует в виде объединений (кластеров).

### **Заключение**

Приведенные выше примеры можно дополнить результатами исследований в других НИУ. Вместе с тем, целесообразно расширить в рамках ЦНТП Росгидромета круг задач по созданию СРО ОЯ, экспертных и других систем оценки последствий (в том числе неблагоприятных последствий изменения климата), основанных на современных системах ДЗА, для чего необходимо:

- разработать и реализовать специализированные программы наблюдений за ОЯ на экспериментальных базах и полигонах;

- оказать существенную поддержку численному моделированию, способному работать с 3-х мерными данными ДМРЛ, ГРС, КА и АМС в единой с наблюдательными средствами системе координат;

- отработать методологию оценки последствий ОЯ с использованием возможностей активно – пассивной радиолокации (поляриметрии), широкополосной грозорегистрации, численного моделирования и усвоения данных ДЗА.

Реализация требований ВМО повышения точности и своевременности предупреждения о вероятном ущербе от ОЯ, связанных с МКК, технически и организационно может многое заимствовать у технологий АВ. В свою очередь, совершенствование методов и средств ДЗА, способствующее физическому пониманию причинно - следственных связей в облаках, обеспечит переход от статистических к физически обоснованным методам оценки эффективности АВ, что укрепит потенциал этих технологий в мире с быстро меняющейся погодой и климатом.

### ***Список литературы***

1. Commission for Basic Systems. Extraordinary session. Asuncion, 8-12 September 2014. Abridged final report with resolutions and recommendations. WMO-No.1140, 721 p.
2. Peres A., Wicker L., Orville R. Characteristics of cloud-to-ground lightning associated with violent tornadoes. *Weather and forecasting*, 1997, 12, p. 428-437.
3. Lang T.J. and Rutledge S.A. Relationships between convective storm kinematics, precipitation and lightning. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, 130, p. 2492-2506.
4. MacGorman D.R., Fliaggi T., Holle R., Brown R. Negative cloud-to-ground lightning flash rates relative to VIL, maximum reflectivity, cell height and cell isolation. *Journal of Lightning Research*, 2007, v. 1, p. 132-147.
5. Бухаров М.В. Диагноз вероятности гроз по спутниковой информации. – *Метеорология и гидрология*, 2013, № 8, с. 5-16.
6. Кулиев Д.Д., Шаповалов А.В. Исследование процессов образования электрического заряда в облаках на основе математического моделирования. Труды VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству, Санкт-Петербург, 2012, с. 152-153.

## **РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЫ «АСУ-ГРАД»**

**Абшаев А.М.<sup>1</sup>, Абшаев М.Т.<sup>1</sup>, Чочаев Х.Х.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

<sup>2</sup>ФГБУ «Северо-Кавказская ВС», г. Нальчик

Успешность предотвращения града определяется совершенством технологии и качеством ее технической реализации. Быстротечность образования града требует засева градовых и градоопасных облаков в условиях острого дефицита времени. Поэтому, большую значимость имеют

оперативность и точность распознавания объектов воздействия (ОВ), выделения места засева и доставки реагента в области будущего градообразования. Решение этих задач может быть достигнуто на основе автоматизации перечисленных противоградовых операций.

Современная российская автоматизированная ракетная технология противоградовой защиты (ПГЗ) предусматривает [1] автоматическое распознавание ОВ, выделение места засева и выработку команд с помощью радиолокационной системы управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» [2]. Засев ОВ осуществляется по командам «АСУ-МРЛ» с помощью сети удаленных ракетных пунктов (РП), имеющих по 1 – 2 ракетных пусковых установок (ПУ), УКВ радиостанцию. Используемая в настоящее время голосовая передача команд с КП на РП и ручное управление основным парком применяемых ракетных ПУ требует содержания постоянного обслуживающего персонала РП из 4 человек (по 2 в смену) строительства жилых и рабочих помещений, склада противоградовых изделий (ПГИ), линии электроснабжения и др. Содержание персонала и инфраструктуры РП повышает себестоимость ПГЗ. Ручной режим работы РП не обеспечивает требуемый по технологии темп засева сверхмощных градовых облаков, что является одной из основных причин пропуска градобитий на защищаемой территории (ЗТ).

В целях устранения этих проблем в 2014 – 2015 гг. на базе Западной ВЧ Северо-Кавказской ВС создан действующий образец программно-технического комплекса «АСУ-Град», обеспечивающий автоматизацию операций по АВ на облачные процессы и применения малолюдной технологии ПГЗ.

### **1. Состав и основные характеристики комплекса «АСУ-Град»**

В состав ПТК «АСУ-Град» входит (рис. 1):

*а) ПТК «АСУ-МРЛ»*, который выполняет функции ПТК «верхнего уровня» по управлению противоградовыми операциями, обеспечивая обнаружение и распознавание градовых и градоопасных облаков, принятие решения о проведении активного воздействия (АВ), выработку команд на ракетный засев, контроль и документирование результатов АВ [2].

*б) ПТК «АСУ-Элия»*, который управляет сетью удаленных ракетных ПУ и выполняет функции ПТК «среднего уровня» по реализации обмена информацией между нижним и верхним уровнями ПТК, включая прием команд их «АСУ-МРЛ», установление связи и передачу команд на РП, контроль их исполнения и ввод сообщений в ПТК «верхнего уровня» [5].

*в) Сеть удаленных ракетных пунктов с автоматизированными ПУ «Элия-2»* выполняет функции ПТК «нижнего уровня» по ракетному засеву ОВ по командам, поступающим из систем управления верхнего уровня.

*г) Система связи и обмена информацией* между ПТК верхнего, среднего и нижнего уровня.

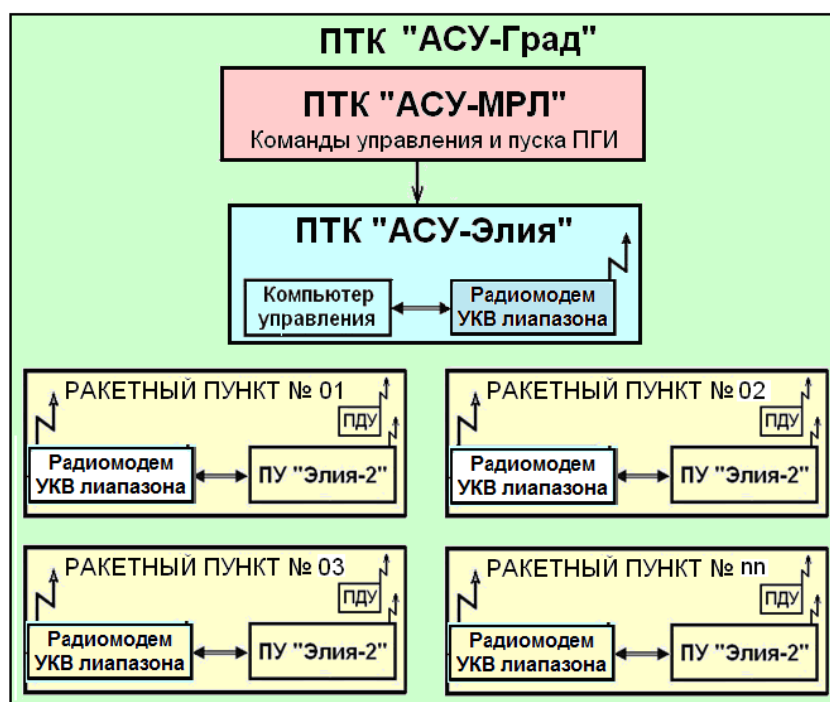


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной системы ПГЗ «АСУ-Град».

Составные части ПТК «АСУ-Град» размещены на следующих позициях:

- ПТК «АСУ-МРЛ» встроены в Куба-Табинский, Кахунский и Ардонский радиолокаторы МРЛ-5 и обеспечивают их работу в автоматическом режиме без участия обслуживающего персонала. Управление режимами работы МРЛ-5 и передача информации на серверы «АСУ-МРЛ» осуществляется по УКВ радиомостам, имеющим скорость передачи информации около 78 МБит/с. Программа автоматической калибровки каждого МРЛ по радиотепловому излучению Солнца и контроль стабильности метеопотенциала в каждом цикле обзора обеспечивает сравнимость показаний МРЛ, размещенных на разных позициях.

- Серверы ПТК «АСУ-МРЛ» и «АСУ-Элия» размещены в Ситуационном Центре Северо-Кавказской ВС в г. Нальчик и на КП Кахунского и Ардонского отрядов службы.

- Ракетные пункты с ПУ «Элия-2» (27 пунктов) рассредоточены на территории Кабардино-Балкарии на удалении до 80 км от МРЛ-5 (рис. 2).

- Система связи включает три базовых радиомодема, установленных на мачтах высотой 30 м, и 27 радиомодемов, встроенных непосредственно в ПУ «Элия-2» (рис. 3).

ПТК «АСУ-Град», обеспечивает автоматизацию противорадовых операций:

- обнаружение и распознавание категорий объектов воздействия в радиусе до 200 км;
- локализацию объема засева с учетом категории и структуры ОВ;
- выбор режима засева в зависимости от параметров ОВ;

- выработку команд на засев ОВ с учетом высоты засева и размещения ракетных пунктов, траекторных характеристик ПГИ и запретных секторов в радиусе до 120 км;
- передачу команд на ракетные пункты;
- дистанционное наведение ракетных установок и пуск ПГИ;
- документирование даты, времени, угловых координат и количество пусков ПГИ;
- документирование материалов АВ.

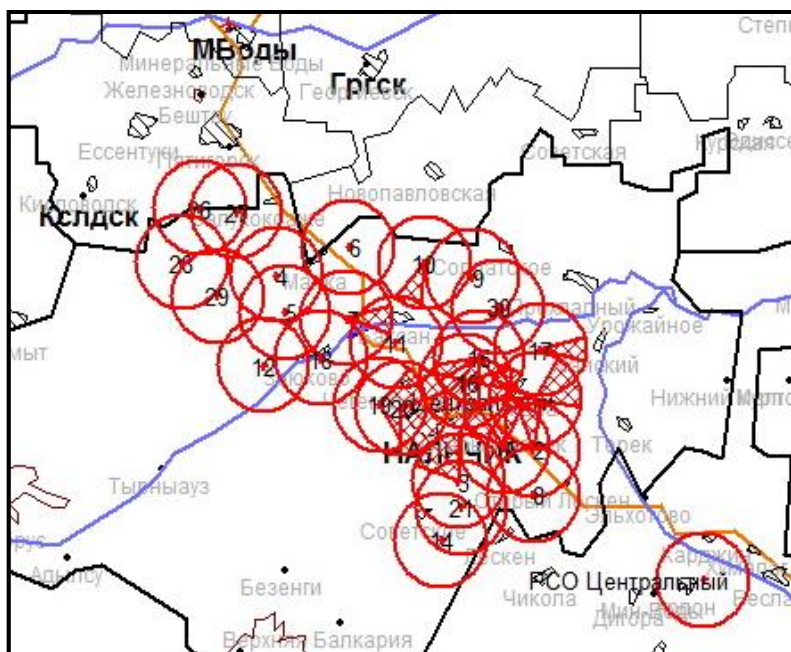


Рис. 2. Карта позиций сети удаленных ПУ «Элия-2».

Описание ПТК «АСУ-МРЛ» и ее возможностей представлено в [2] и частично приведено в настоящем сборнике [2, 4] и для экономии места здесь не приводится.

## 2. Система связи и управления

В процессе разработки были апробированы варианты системы связи и управления с применением спутниковой, сотовой и радиосвязи.

*Применение спутниковой системы «VSAT DirecWay»* показало, что она вполне соответствует требованиям по скорости передачи информации для любой позиции ракетного пункта, но в случае экранировки спутника интенсивными ливневыми и градовыми осадками могут быть перерывы связи. Ограничивает его применение и высокая стоимость трафика.

*Испытание системы сотовой GSM/GPRS* связи показало, что зачастую отмечаются случаи перерывов связи ПТК «АСУ-Элия» с некоторыми с ПУ, что недопустимо при проведении АВ. Попытки повышения надежности связи путем улучшения качества антенн, высоты их размещения и совершенствования программного обеспечения не исключила перерывы связи, так как цифровая связь функционирует на вторичной основе.

Для решения этой проблемы и исключения зависимости от провайдера GSM/GPRS связи были проанализированы возможности современных радиомодемов («DataRadio», «Guardian», «Viper-SC», «Integral», «Racom») и создана своя радиосеть обмена информацией с использованием радиомодемов «Racom RipEX». Выбран диапазон частот 160 – 175 МГц, на котором связь даже в горных и предгорных районах, более надежна, чем в диапазонах 400 или 800 МГц, и может быть удовлетворительной в условиях отсутствия прямой видимости (за счет переотражений радиоволн).

На рис. 3 представлена функциональная схема, реализованной в «АСУ-Элия» системы связи и управления множеством территориально разнесенных ПУ «Элия-2». Создание такой собственной радиосети имеет следующие преимущества:

- возможность проектирования зоны покрытия с учетом размещения ПУ и «АСУ-Элия» с использованием при необходимости направленных антенн и ретрансляторов;
- высокая оперативность соединения – время установления соединения после запроса у современных радиомодемов составляет десятки миллисекунд;
- автономность системы связи и отсутствие непредвиденных задержек и отключений;
- немедленная адресная доставки информации;
- высокая надежность передачи информации при любой метеорологической (гроза, град, паводок) и общественной ситуации;
- круглосуточная готовность и отказоустойчивость системы связи.

Создание такой радиосети более затратно по сравнению с GSM/GPRS системой связи, но более экономично при эксплуатации (не требует абонентской платы, платы за трафик).

Скорость обмена информацией в радиосети составляет 19,2, 9,6 или 4,8 Кбит/с (в зависимости от профиля местности и метеоусловий). Этого вполне достаточно для обмена информацией в системе «АСУ-Град», так как объем передаваемых пакетов информации не превышает 50 байт. Использование мультиплексной (точка-многоточка) и топологии связи, в которой каждый радиомодем функционирует в режимах приема-передачи и ретрансляции обеспечило повышение надежности радиообмена.

Работа радиосети организуется по опросу «АСУ-Элия», который направляет запрос в адрес контроллера удаленного ПУ «Элия-2». Этот запрос передается в эфир и принимается всеми базовыми станциями и находящимися в зоне электромагнитной доступности удаленными ПУ «Элия-2», однако ответ на данный запрос дает только та ПУ, которой этот запрос адресован. Ответ на запрос передается в обратном порядке: ПУ «Элия-2» – базовая станция – «АСУ-Элия». Все базовые станции, входящие в состав «АСУ-Элия» установлены на мачтах высотой 30 м и

работают на одной частоте, поочередно. Взаимные помехи исключаются тем, что передача инициируется только по запросу «АСУ-Элия».

Для обеспечения надежности обмена информацией реализуется принцип «Облако» с автоматической ретрансляцией в случае отсутствия прямой видимости с удаленными ПУ. Обмен данными складывается из набора последовательных микроопераций «запрос-ответ»:

- генерация запроса «АСУ-Элия» и ввод в радиомодем;
- установление связи базовой станции с ПУ «Элия-2» и передача запроса;
- обработка запроса в контроллере ПУ «Элия-2» и генерация ответа;
- установление связи между контроллером ПУ и радиомодемом и передача ответа от контроллера ПУ в радиомодем;
- передача ответа от радиомодема в «АСУ-Элия».

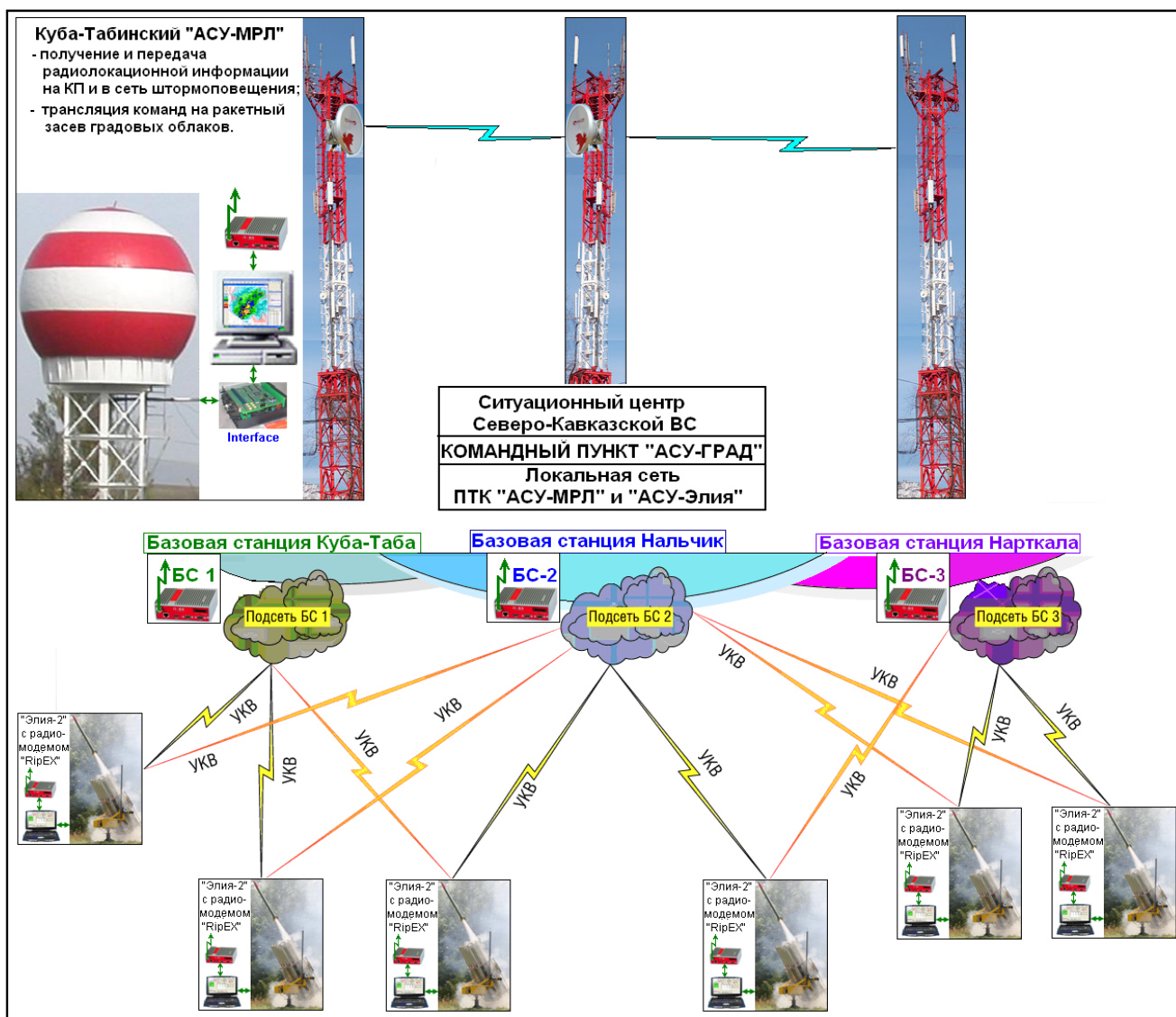


Рис. 3. Блок-схема системы связи экспериментального образца «АСУ-Град».



По данным натурных испытаний время выполнения этих микроопераций и, следовательно, суммарная задержка обмена данными на радиомодемах «RipEX» составляет около 0,1 - 0,2 сек, а скорость передачи 19,2 Кбит/с. Таким образом, продолжительность транзакции в радиосети обмена данными на радиомодемах такого типа позволяет обслуживать одной базовой станцией не менее 32 ПУ «Элия-2» в минуту даже при ухудшении условий приема и повторной передаче 100% сообщений.

### **3. Автоматизированная система управления «АСУ-Элия»**

Автоматизированная система управления «АСУ-Элия» служит для беспроводного управления сетью удаленных ракетных установок «Элия-2». В его состав входит:

- управляющий компьютер типа Pentium IV;
- автоматизированные ракетные ПУ «Элия-2», удаленные до 80 км и более [3];
- радиомодемы КП, встроенная в ПУ «Элия-2» и ретрансляторы;
- специальное программное обеспечение «АСУ-Элия».

*Компьютер* ПТК «АСУ-Элия» работает в составе локальной сети с компьютером ПТК «АСУ-МРЛ», который осуществляет обнаружение градовых и градоопасных облаков, распознавание категорий ОВ и выработку команд на их засев. Эти команды с компьютера «АСУ-МРЛ» поступают в компьютер «АСУ-Элия», который обеспечивает контроль состояния и управление сетью удаленных ПУ «Элия-2», включая:

- отображение состояния сети ПУ (до 32 ил 48 шт.) на едином мониторе;
- обмен данными между КП и ПУ в параллельном режиме;
- передачу команд на пуск ПГИ, контроль их выполнения и регистрацию даты, времени, количества и координат пуска ПГИ по типам;
- сбор данных автоматических метеостанций, встроенных в ПУ «Элия-2», и получение карт территориального распределения температуры, давления и влажности воздуха при прохождении градовых облаков и фронтальных разделов на фоне карты местности.

*Программное обеспечение* ПТК «АСУ-Элия» написано в ОС Windows XP и может работать в ОС Windows Vista, а также Windows-7.

На панели управления сетью удаленных ПУ «Элия-2» отображаются:

- номера и наименования РП, на которых установлены управляемые ПУ;
- заводской номер ПУ «Элия-2»;
- состояние режима управления ПУ (автомат, полуавтомат);
- угловое положение ПУ по азимуту и вертикали;

- напряжение аккумуляторов ПУ «Элия-2»: АКБ1 и АКБ2;
- состояние концевых выключателей и ключей пусковых цепей верхнего и нижнего уровней, количество заряженных направляющих;
- идентификационный номер Wireless ID и время контроля;
- IP адрес порта, номер порта, IP адрес шлюза и номер шлюза.

Эта панель позволяет следить за состоянием всех управляемых ПУ.

На рис. 4 представлена панель пульта беспроводного дистанционного сетью ракетных пуктов, а на рис. 5 панель управления конкретной ПУ «Элия-2». Панель представлена в режиме передачи и контроля выполнения команд на пуск ПГИ, используемого в качестве аварийного. На панели отображаются номер ПУ, состояние ПУ (угловое положение, напряжение аккумуляторов, состояние концевых выключателей и ключей пусковых цепей, кодичество заряженных направляющих), наличие связи и готовность ПУ к выполнению команд и др.

АСУ-Элия

Связь Настройки Команды Помощь

Монитор ПУ Выбранная ПУ Планшет Метео карта Модемы СМС Журналы

ПУ "Элия-2" вышедшие на связь

№	ПВ	Район	ПУ	Режим	Угол	Азим	АКБ1	АКБ2	Кл.вхн	Кл.нжн	Кнц.вхн	Кнц.нжн	ПГИ	ПДУ	Wireless ID	Время подключения	Послед. подключе...	IP Адрес	Порт	IP шлюза	Порт шлюза	
1	Централь...	КДП "Псынабо"	35	АВТО	5	100	14,3 В	14,0 В	Ок	Ок	Ок	Ок	5 шт.		50350000000	2011-05-10 14:50:45	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.101	5035	85.26.182.101	5035	
2	1	Псыгансу	16																			
3	2	Аргудан	19	АВТО	5	20	13,8 В	13,8 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50190000000	2011-05-10 14:49:50	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.117	5019	85.26.182.117	5019	
4	3	Аушигер	38	АВТО	5	20	14,3 В	14,0 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50380000000	2011-05-10 14:49:49	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.102	5038	85.26.182.102	5038	
5	4	Сармаково	25	ПДУ	5	10	14,2 В	14,2 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50250000000	2011-05-10 14:50:40	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.109	5025	85.26.182.109	5025	
6	5	В.Куркужин	33	ПДУ	5	0	14,0 В	13,6 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50330000000	2011-05-10 14:49:51	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.98	5033	85.26.182.98	5033	
7	6	Куба-Таба	37																			
8	7	Полигон ВГИ	29	АВТО	5	260	14,2 В	14,1 В	Ок	Ок	Ок	Ок	5 шт.		50290000000	2011-05-10 14:50:26	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.104	5029	85.26.182.104	5029	
9	8	Лескен-2	11	АВТО	5	200	13,4 В	14,4 В	Ок	Ок	Ок	Ок	4 шт.		50110000000	2011-05-10 14:50:05	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.108	5011	85.26.182.108	5011	
10	9	Псыншоко	36	АВТО	5	240	14,1 В	14,2 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50360000000	2011-05-10 14:50:23	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.113	5036	85.26.182.113	5036	
11	10	Кр. Константин.	23	АВТО	59	218	13,9 В	13,9 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50230000000	2011-05-10 14:50:28	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.114	5023	85.26.182.114	5023	
12	11	Баксан	24	АВТО	5	240	13,7 В	14,1 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50240000000	2011-05-10 14:50:26	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.106	5024	85.26.182.106	5024	
13	12	Кенделен	31	АВТО	5	260	14,5 В	14,5 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50310000000	2011-05-10 14:49:57	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.120	5031	85.26.182.120	5031	
14	14	Жемтала	12	АВТО	5	220	14,3 В	14,4 В	Ок	Ок	Ок	Ок	5 шт.		50120000000	2011-05-10 14:50:18	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.122	5012	85.26.182.122	5012	
15	15	Герменчик	30	АВТО	5	10	13,6 В	13,9 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50300000000	2011-05-10 14:50:20	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.105	5030	85.26.182.105	5030	
16	16	Нартан	14	АВТО	5	0	14,2 В	13,5 В	Ок	Ок	Ок	Ок	5 шт.		50140000000	2011-05-10 14:51:10	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.100	5014	85.26.182.100	5014	
17	17	Кондрасинский	17	АВТО	5	0	14,1 В	14,5 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50170000000	2011-05-10 14:50:05	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.107	5017	85.26.182.107	5017	
18	18	Заюково	34																			
19	19	Нальчик-20	15																			
20	20	Кенже	18	АВТО	0	0	0,0 В	0,0 В	Ок	Ок	Ок	Ок	0 шт.		50180000000	2011-05-10 14:50:08	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.116	5018	85.26.182.116	5018	
21	21	Зарагиз	28	АВТО	5	75	14,1 В	14,3 В	Ок	Ок	Ок	Ок	8 шт.		50280000000	2011-05-10 14:50:05	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.121	5028	85.26.182.121	5028	
22	26	Белокаменское	20	АВТО	5	0	13,6 В	13,4 В	Ок	Ок	Ок	Ок	4 шт.		50200000000	2011-05-10 14:49:52	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.119	5020	85.26.182.119	5020	
23	27	Шардаково	10	АВТО	50	199	14,5 В	14,8 В	Ок	Ок	Ок	Ок	6 шт.		50100000000	2011-05-10 14:49:55	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.110	5010	85.26.182.110	5010	
24	28	Кичмалка	26	АВТО	5	80	13,8 В	13,8 В	Ок	Ок	Ок	Ок	0 шт.		50260000000	2011-05-10 14:51:54	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.112	5026	85.26.182.112	5026	
25	29	Каменноостское	27	ПДУ	5	10	14,2 В	13,9 В	Ок	Ок	Ок	Ок	3 шт.		50270000000	2011-05-10 14:50:18	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.103	5027	85.26.182.103	5027	
26	30	Благовещенка	13	АВТО	5	270	14,1 В	15,1 В	Ок	Ок	Ок	Ок	5 шт.		50130000000	2011-05-10 14:50:20	2011.05.10 14:55:34	85.26.182.123	5013	85.26.182.123	5013	
27	26 КЧР	КЧР Центральный	22																			
28	РСО Цен..	РСО Ардон	21																			

НПЦ "Антиград" Сервер запущен IP адресс: 85.26.182.97 На связи 23 ПВ

Рис.4. Панель управления сетью удаленных ПУ «Элия-2».



На рис. 6. представлена панель пульта беспроводного дистанционного управления конкретной ПУ «Элия-2», располагаемого непосредственно на ПВ. Панель представлена в режиме передачи и контроля выполнения команд на пуск ПГИ, и используется в качестве аварийного. На панели отображаются:

- номер ПУ;
- состояние ПУ (угловое положение, напряжение аккумуляторов, состояние конечных выключателей и ключей пусковых цепей, количество заряженных направляющих);
- наличие связи;
- готовность ПУ к выполнению команд и др.

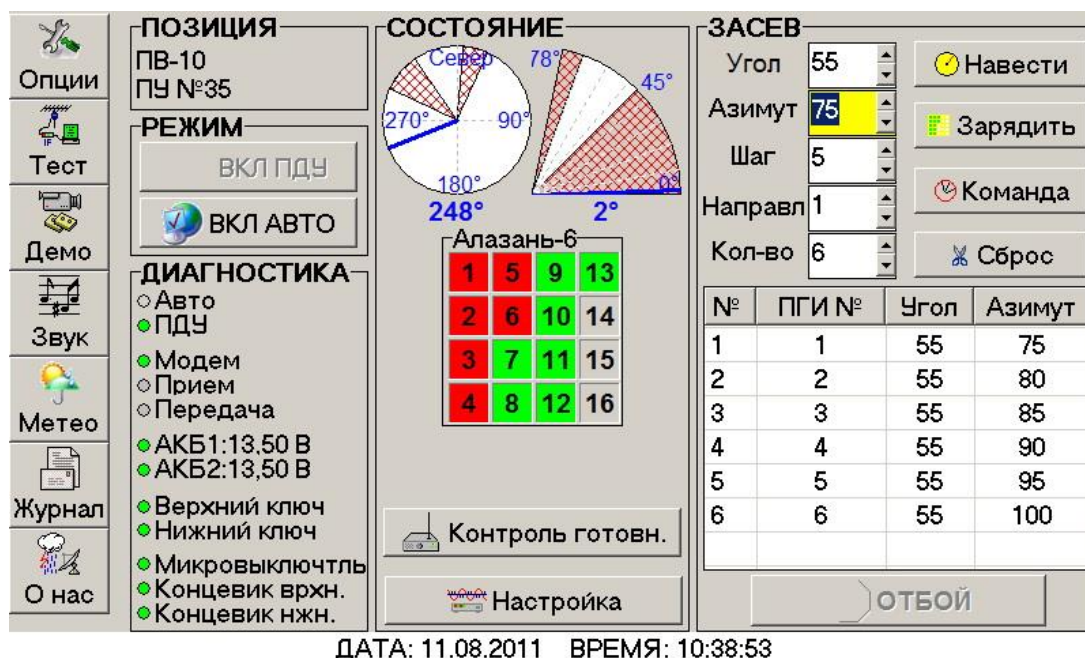


Рис. 6. Панель управления ПУ «Элия-2» с пульта беспроводного дистанционного управления.

Красным выделены направляющие, на которые выработана команда на пуск ПГИ, зеленым – заряженные направляющие, а серым – направляющие в которых нет ПГИ.

#### 4. Автоматизированный ракетный пункт

Схема оборудования автоматизированного РП представлена на рис. 7, а схема системы связи на РП – на рис. 8.

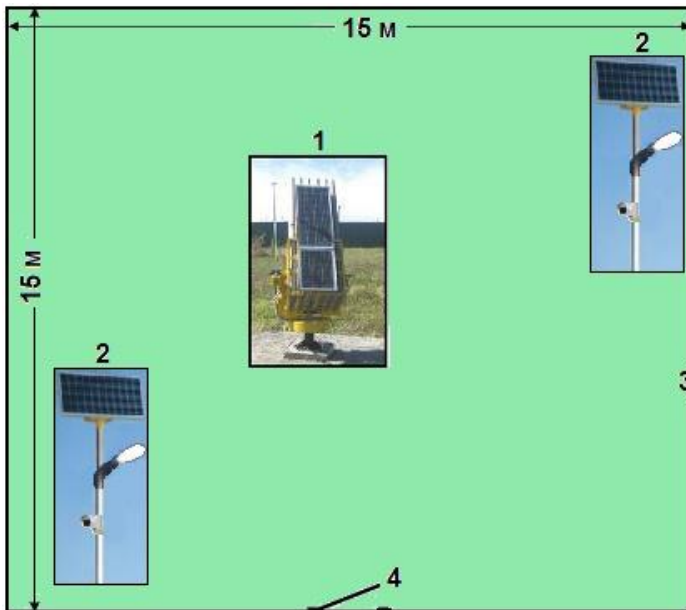


Рис. 7. Схема оборудования РП:

1. ПУ «Элия-2».
2. Мачта с прожектором освещения, видеокамерой и солнечной батареей.
3. Ограждение с охранной сигнализацией.
4. Въездные ворота.

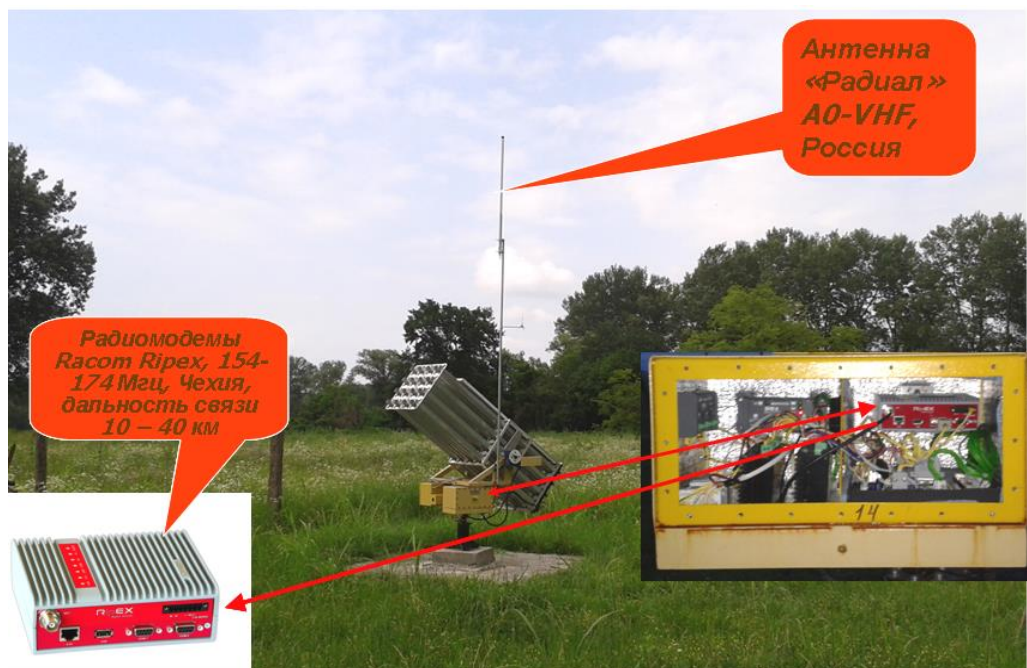


Рис. 8. Схема связи на автоматизированном РП. Связь с видеокамерой не показана.

На период апробации и опытной эксплуатации автоматизированные РП созданы на действующих ракетных Северо-Кавказской ВС. В перспективе они должны быть безлюдными, но размещаться на территории охранных зон для обеспечения безопасности исключения доступа посторонних лиц и актов вандализма.

Многочисленность ПУ «Элия-2» (36 ПГИ типа «Ас», 20 ПГИ типа «Алазань-9» и 16 ПГИ типа «Алазань-6») обеспечивают проведение АВ на градовые процессы. Дозарядка ПУ может осуществляться мобильной группой или персоналом охранной территории.

## 5. Алгоритм работы ПТК «АСУ-Град» результаты апробации

Алгоритмы работы «АСУ-Град» изложены в [1] и реализованы в программном обеспечении, которое обеспечивает работу в режимах «Дежурство» и «Воздействие».

### ***В режиме «Дежурство»:***

⇒ ПТК «АСУ-МРЛ» автоматически обеспечивает: периодический дежурный обзор пространства, оценку градоопасности облаков, архивирование файлов обзора и при обнаружении ОВ переходит в режим «Воздействие».

⇒ ПТК «АСУ-Элия» автоматически осуществляет:

- радиосвязь с каждым ПВ с заданной периодичностью и опрос состояния всех управляемых ПУ «Элия-2» по идентификационным кодам;

- документирование результатов контроля состояния всех ПУ и отображение на панели управления (рис. 5);

- ожидание команд от «АСУ-МРЛ».

⇒ контроллер ПУ «Элия-2» по каждому запросу ПТК «АСУ-Элия»:

- обеспечивает автоматический опрос датчиков углового положения, пусковых цепей и аккумуляторов;

- формирует и передает сообщение о состоянии ПУ;

- переходит в «спящий режим» с минимальным потреблением энергии.

### ***В режиме «Воздействие»:***

⇒ «АСУ-МРЛ» обеспечивает:

- программный обзор пространства с цикличностью  $3,3 \pm 0,2$  мин;

- обнаружение и распознавание ОВ;

- выделение объемов засева в ОВ разных категорий (объемов, где проходят начальные стадии образования града);

- выбор ПУ «Элия-2», могущих оптимально засеять выделенные объемы;

- выбор режима засева ОВ (массированный, нормальный, экономичный);

- расчет команд на пуск серии ПГИ, содержащих угол возвышения, азимут, шаг по азимуту, количество ПГИ и номера направляющих ПУ. Команда может предусматривать пуск серии ПГИ (от 1 до 36 шт.) в зависимости от масштаба и местоположения ОВ. Шаг по азимуту может быть любой (от 5 до 10 градусов) в зависимости от режима засева (массированный, экономичный, нормальный);

- ввод команды в «АСУ-Элия».

⇒ «АСУ-Элия» обеспечивает:

- установление связи и передачу команд «АСУ-МРЛ» на требуемую ПУ «Элия-2»;
- контроль наведения ПУ и пуска ПГИ в заданные координаты;
- документирование даты, времени и координат пусков ПГИ и отображение на

панели управления (рис. 6.6);

- переход в режим ожидания следующей команды.

⇒ контроллер ПУ «Элия-2» по команде ПТК «АСУ-Элия»:

– обеспечивают автоматическое наведение ПУ на угол возвышения и азимут первого пуска (первый азимут в серии) и пуск ПГИ;

– наведение ПУ на второй азимут и пуск ПГИ и т.д. пока не будут выполнены все пуски ПГИ в серии;

- выдачу команды «Зарядить», если на ПУ осталось менее 6 ПГИ;
- формирует и передает сообщение о состоянии ПУ;
- переводит систему электропитания в «спящий режим».

**Полевые испытания** ПТК «АСУ-Град» на примере управления 27 ПУ «Элия-2», подтвердили ее работоспособность по заложенным в ней алгоритмам, включая:

– автоматический радиолокационный обзор пространства, обнаружение и распознавания ОБ;

– оперативную выработку команд на засев ОБ в «АСУ-МРЛ», их ввод в «АСУ-Элия» и передачу на управляемые ПУ;

– обеспечение автоматической связи и обмена информацией между «АСУ-Элия» и РП по заданному оператором временному циклу;

- оперативный контроль состояния всех управляемых ПУ «Элия-2»;

– дистанционное беспроводное наведение ПУ «Элия-2» по угловым координатам с точностью  $\pm 0,5$  градуса и пуск серии ПГИ;

- документирование даты, времени и координат пусков ПГИ.

## **Заключение**

1. Роботизированный комплекс «АСУ-Град» обеспечивает повышение оперативности выработки, передачи и контроля исполнения команд на засев облаков, устранение субъективных ошибок персонала, повышение темпа засева облаков и реализацию малолюдной автоматизированной технологии ПГЗ и ослабления сопутствующих градобитиям опасных явлений (грозы, ливневых осадков, приводящих к формированию паводков и селей ливневого генезиса, шквалов и смерчей).



2. Применение автоматизированных ракетных может обеспечить повышение эффективности и снижение себестоимости ПГЗ, поэтому в ряде стран (Сербия, Босния-Герцеговина, Китай, Грузия, Румыния) создаются и начато применение подобных систем [6, 7 и др.].

3. ФГБУ «ВГИ» в рамках тематики НИОКР Росгидромета разрабатывает ракетный метод искусственного увеличения осадков в засушливые периоды года с использованием инфраструктуры противоградовых служб с целью расширения функций технологии и технических средств ПГЗ.

### ***Список литературы***

1. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Малкарова А.М., Барекова М.В., 2014: Руководство по организации и проведению противоградовых работ. – Нальчик: Печатный двор, 508 с.
2. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации для целей штормооповещения и активного воздействия на облачные процессы // Труды XXVII Симпоз. по радиолок. зондированию природных сред. – СПб. - 2011. – С. 211-225.
3. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Зорин В.А., Кратиров Д.В., Михеев Н.И., 2014: Автоматизированный малогабаритный противоградовый комплекс «Ас-Элия» // См. настоящий сборник.
4. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Ефремов В.С., Вылегжанин И.С. Российские метеорологические радиолокаторы для исследований и активного воздействия на облака // См. настоящий сборник.
5. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Kuznecov B.K., Chochaev H.H., etc. New advances in automation of anti-hail rocket technology // Proc. of 10<sup>th</sup> WMO Conf. Weather Mod. – Bali, Indonesia. – 2011. – P. 279-282
6. Амиранашвили А.Г., Дзодзуашвили У.В, Глonti Н.Я., Кайшаури М.Н., Саури И.П., Чаргазия Х.З., Чихладзе В.А. Обновленная Служба борьбы с градом в Кахетии и перспективы развития работ по модификации погоды в Грузии // См. настоящий сборник.
7. Wang Yilin, Wang Jianguo, Li Desheng. An Automated Rocket Operation System of Weather Modific. // Proc. of 10<sup>th</sup> WMO Conf. Weather Mod. – Bali, Indonesia. – 2011. – P. 293-296.

**МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЫ  
ГОРОДОВ И СЕЛЬХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР,  
НАХОДЯЩИХСЯ В СЕКТОРАХ, ГДЕ ПУСКИ  
ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАКЕТ ЗАПРЕЩЕНЫ**

**Бейтуганов М.Н., Чочаев Х.Х.**

«Северо-Кавказская военизированная служба по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы», г. Нальчик

В практике противогорадовой защиты, проводимом ракетным способом внесения реагента, в целях обеспечения безопасности населения, над крупными населёнными пунктами и городами вводятся запретные сектора, исключаяющие возможность попадания на их территории противогорадовых ракет (ПГР) или фрагментов их самоликвидации. В связи с необходимостью выполнения военизированными противогорадовыми службами (ВС) этого требования, крупные населённые пункты и города практически от града не защищаются. Отсутствие градовой защиты городов и прилегающих к ним территорий, в частности, дачных участков, наносит им большой экономический ущерб. Из-за дороговизны открытия новых пунктов воздействия (далее ПВ), некоторые участки даже внутри защищаемой территории (ЗТ), обстреливаются не полностью. Например, в Баксанском районе, существующими ПВ не перекрываются районы вблизи сельских поселений Карагач, Баксанёнок и жители этих поселений из года в год просят руководство Республики открыть дополнительные ПВ. Предлагаемый метод противогорадовой защиты непростреливаемых ПГР участков распространяется, прежде всего, на территории, находящиеся внутри ЗТ ВС. Физической основой метода является предварительный засев частицами кристаллизующего реагента (ЧКР) пространства, над подлежащим защите объектом. Объём этого пространства будет определяться его площадью и высотой между изотермами  $-2^{\circ}\text{C}$  и минус  $15^{\circ}\text{C}$ , где происходит образование зародышей града, что при градиенте температуры в облаке  $6,3^{\circ}\text{C}/\text{км}$  составит 2060 м. Создавая в данном объёме с помощью ЧКР при концентрации  $10^4\text{м}^{-3}$  вновь образованными кристалликами, мы будем способствовать образованию частиц жидких осадков, а создавая концентрацию ЧКР в  $10^5 - 10^6\text{м}^{-3}$  сможем образовать уже конкурирующие с естественными, искусственные зародыши града и тем самым предотвращать образование крупных градин. Так как, зарождение новых ячеек в основном происходит на высотах около 7 км, то интервал температур на этой высоте в зависимости от высоты изотермы  $0^{\circ}\text{C}$  может изменяться от  $-22^{\circ}\text{C}$  при  $H_0=3,5$  км до  $-25^{\circ}\text{C}$  при  $H_0=4$  км. Высоты нулевых изотерм выбраны вследствие того, что около 70% дней с активным воздействием проводимом в зоне ответственности Северо-Кавказской ВС за 5-летний период приходятся на эти

высоты. Предлагаемый метод предотвращения града основан на заблаговременном разрешении энергии неустойчивости атмосферы, путём создания на некотором расстоянии перед внутримассовыми и фронтальными облаками новых ячеек, при помощи создаваемого перед ними пространственного объема из ЧКР. Важнейшим звеном в методе является определение времени создания ЧКР требуемой концентрации над пространством защищаемого объекта или участка. С этой целью предлагается использовать установленный в работе [1] процесс формирования внутримассовых и фронтальных многоячеековых облаков. Экспериментально обнаружено, что в условиях Ленинградской области в день с внутримассовым развитием облаков, в 80% случаев новые ячейки появлялись на расстоянии около 13 км, а при формировании фронтальных многоячеековых облаков новые ячейки чаще всего появлялись на расстояниях около 6 км относительно старшей ячейки. Зная расстояние от внутримассового или фронтального облака до защищаемого объекта и скорость перемещения этих облаков, легко определить время, необходимое для перемещения дымового шлейфа, состоящего из ЧКР от противорадовой ракеты, до защищаемого объекта. Оптимальные для внесения ЧКР пункты воздействия будут определяться направлениями воздушных потоков на высотах изотерм  $H_0$  и  $H_{-15}$ . При этом дымовой шлейф должен быть ориентирован перпендикулярно направлению воздушного потока на заданных высотах. ЧКР из шлейфа будут распространяться по направлению ведущего потока и вверх, как от мгновенного источника. Дозировка количества ЧКР, необходимое для обеспечения концентрации частиц в объёме над выбираемым для защиты объектом, в основном, зависит от его площади. В качестве объекта защиты выберем г. Баксан с прилегающими к городу территориями общим диаметром около 10 км. Для заполнения этого объёма ЧКР с концентрацией  $10^5 \text{ м}^{-3}$ , достаточной для образования частиц осадков и предотвращения града, пространства цилиндрической формы до высоты изотермы  $-15^\circ\text{C}$ , т.е. высотой 2380 м над объектом, при выходе ЧКР с одной противорадовой ракеты  $10^{16}$  штук, понадобится одна ракета. Возможная полная кристаллизация облачных капель размерами более 100 мкм, которые могут переохлаждаться до  $-25^\circ\text{C}$  по Бигу [2], можно достигнуть, внося ещё одну-две ракеты на высоту изотермы  $-15^\circ\text{C}$  и тем самым предотвратить образование града. Следует отметить, что концентрация кристаллов, необходимых для полной кристаллизации капельного облака при температуре  $-20^\circ\text{C}$  в течение 10 минут по Прупахеру [2] равна  $10^5 \text{ м}^{-3}$ . Схематическая карта защищаемой от града территории КБР приведена на рисунке, где расположение 29 пунктов воздействия – ПВ отмечены их номерами.

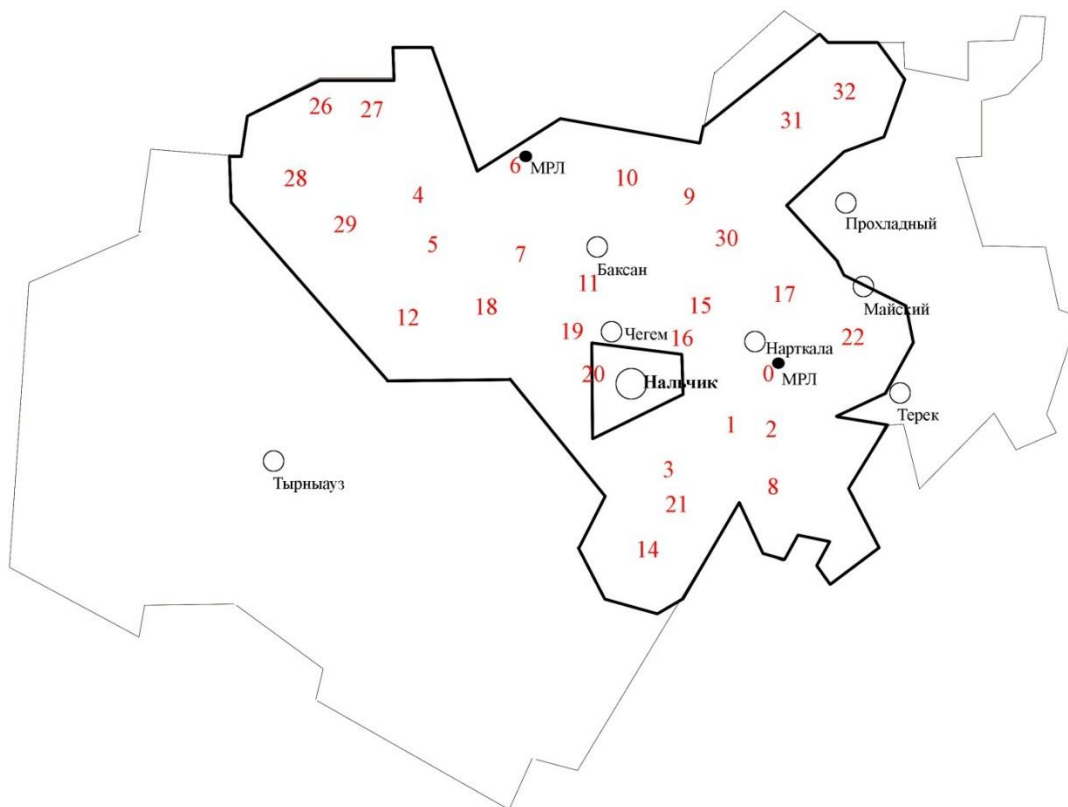


Схема защищаемой территории в КБР.

Общая площадь ЗТ в 2017 г. в КБР составила 481,4 тыс. га. Запретный сектор для города Нальчика находится внутри трапеции. Из схематической карты видно, что некоторые трудности по градозащите приграничных ЗТ городов могут возникнуть в зависимости от направления движения ведущих потоков на высотах  $H_0$  и  $H_{-15}$ . Такими направлениями являются: для города Нальчик юго-западное направление, для города Терек - юго-восточное и восточное направления, для города Майский - восточное направление и для города Прохладный - восточное и северо-восточное направления. Для обеспечения градовой защиты этих городов предлагаемым методом, необходимо открыть дополнительно 4-5 новых ПВ. В таблице приведены номера ПВ, с которых следует запускать противогодровые ракеты с азимутами, соответствующими различным направлениям ведущего потока, для 7 городов КБР.

**Номера ПВ,  
привлекаемых для градозащиты городов КБР**

ПВ	С-З, <sup>0</sup>	З, <sup>0</sup>	ЮЗ, <sup>0</sup>	ЮЮЗ, <sup>0</sup>	Ю, <sup>0</sup>	ЮВ, <sup>0</sup>	СВ, <sup>0</sup>	В, <sup>0</sup>	С, <sup>0</sup>
<b>г. Нальчик</b>									
20	340,180								
19							90,180		
16						120,300			
1					330,220				
<b>г. Баксан</b>									
7	60,100								
11						330,220			
10					60,300				
9						60,70			
<b>г. Чегем</b>									
19	110,50								
11				220,120					
16								290	
15			220,260						
<b>г. Нарткала</b>									
16	60,120								60,120
17				140,240					
22							280,240		
Ц					70,50				
<b>г. Прохладный</b>									
2						45,320			
30	60,100	60,100							
<b>г. Майский</b>									
17		80,20	80,20						
22					50,230				
<b>г. Терек</b>									
2		30,120							
Ц	60,160								
22	110,210								

Для выбранной в качестве примера градовой защиты г. Баксан, при северо-западном направлении ведущего потока запуски ракет следует производить с 7 ПВ по азимутам 60 и 100 градусов, при юго-восточном направлении – с 11 ПВ по азимутам 330 и 220 градусов, при южном направлении – с 10 ПВ по азимутам 60 и 300 градусов и при юго-восточном направлении - с 9 ПВ по азимутам 60 и 70 градусов. При указанных в таблице азимутах шлейф с ЧКР будет перпендикулярен направлению ведущего потока, и поток доставит реагент к защищаемому объекту. Распространение ЧКР будет происходить как от мгновенного линейного источника. Время запуска ракет для предзасева ЧКР пространства над объектом защиты (ОЗ) следует определять с

учётом скорости ведущего потока и расстояния  $l$  от ПВ до крайней границы ОЗ. Кроме этого, необходимо учесть и расстояния, на которых перед облаками возникают новые ячейки – 13 км для внутримассовых и 6 км для фронтальных облаков. Крайняя граница ОЗ определяется его протяжённостью. Поэтому время заполнения пространства над ОЗ следует определять с учётом расстояния от ПВ до крайней границы и это расстояние для 7 ПВ составит около 16 км. При скорости ведущего потока 10 м/с время заполнения составит около 27 минут. За такое же время, при образовании новой ячейки перед фронтом, облако должно сместиться к ОЗ на расстояние около 6 км. Поэтому, если облако движется с такой же скоростью, как и ведущий поток, то необходимо запускать ракеты при расстоянии между облаком и ПВ равном 16 км. Если же над ОЗ перед внутримассовым облаком будет возникать новая ячейка, то при той же скорости время заполнения пространства ЧКР останется прежним, т. е. равным 27 минутам, а пуски ракет следует произвести при расстоянии между облаком и ОЗ равном около 30 км. Количество ракет, необходимых для заполнения пространства над ОЗ, следует оценить исходя из выхода ЧКР с 1 грамма йодистого серебра. Используемая в противорадовой защите ракета «Алазань-6» содержит 660 граммов реагента и при  $T = -10^0\text{C}$  выход ЧКР с 1 г составляет в среднем  $1,0 \cdot 10^{12}$  частиц, а 1 ракета даёт ЧКР  $6,6 \cdot 10^{15}$  частиц. Учитывая длину трассы дымления равную 6 км, получим количество ЧКР, приходящееся на 1 метр дымового шлейфа –  $1,1 \cdot 10^{11}$  частиц. Когда оценивается начальная концентрация для различных целей, целесообразно исходить из некоторого диаметра дымового шлейфа. Так как ЧКР выходит из 3 отверстий в головке ракеты калибром 82 мм, то за реальный диаметр можно считать  $D_1 = 0,2$  м и получить начальную концентрацию для цилиндра с таким диаметром и длиной 1 м –  $1,22 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . Используемый при расчётах [3] начальный диаметр «трубы», равный 5 м, даст концентрацию около  $5,6 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ , что почти в 2 раза меньше, чем требуется по действующим РД [3,4] –  $10^{11} \text{ м}^{-3}$ . Поэтому рекомендуется [3,4] вносить ракеты в два раза чаще во времени или в пространстве, что ведет к увеличению расхода ракет.

В начальный момент времени перенос шлейфа из ЧКР происходит целиком под действием ведущего и вертикального потоков, без рассеяния в пространстве. ЧКР начинают рассеиваться после того, как в шлейф начинают проникать воздушные потоки. Этот процесс зависит от величины начальной концентрации и размеров частиц. По Райсту [5] минимальная концентрация, при которой поток может проникать в «облако» из частиц, даётся формулой:  $C = 5 / \pi d D^2$ , где  $d$  и  $D$  соответственно диаметры частицы и «облака» из частиц. Тогда для шлейфа с диаметром  $D = 0,2$  м и ЧКР с  $d = 10^{-7}$  м получим  $C = 4 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ . Из отношения начальной концентрации к критической по Райсту, равной  $3 \cdot 10^3$  следует, что шлейф цилиндрической формы должен расширяться до диаметра, превышающего начальный диаметр в 55 раз. Процесс расширения шлейфа до проникновения в него турбулентности одной термической или конвективной диффузией

трудно объяснить. Когда же поток проникает в шлейф, то привлечение коэффициента турбулентной диффузии позволяет объяснить расширение ареала ЧКР в пространстве. Смещение единичного участка шлейф можно оценить по формуле:  $L = (4Qt)^{1/2}$ , где Q - коэффициент турбулентной диффузии, t - время. Мёртвые зоны, существование которых обусловлено 4-х километровой задержкой диспергирования кристаллизующих реагентов в противорадовой ракете «Алазань-б», можно заполнять ЧКР посредством заблаговременных встречных пусков ракет воздушным потокам. Таким методом можно улучшить противорадовую защиту приграничных ЗТ городов. Рассмотренный метод защиты городов или отдельных площадей с ценными сельскохозяйственными насаждениями применим для всех регионов, где осуществляются противорадовые работы.

### ***Список литературы***

1. Стасенко В.Н. Радиолокационное исследование многоячеистых конвективных (грозовых) облаков. Санкт-Петербург. Гидрометеоиздат, 2004, 90с.
2. И.П. Мазин, А.Х. Хргиан. Облака и облачная атмосфера (справочник специалиста), Л., Гидрометеиздат, 1989, 647с.
3. Абшаев М.Т. и др. Руководство по организации и проведению противорадовых работ. Нальчик. - Печатный двор. 2014. - 508с.
4. Руководящий документ РД52.37.731 – 2010. Организация и проведение противорадовой защиты.- Нальчик. - ООО «Редакция журнала «Эльбрус». 2010. - 85с.
5. Райст П. Аэрозоли, введение в теорию. М., Изд-во «Мир». 1987.-239с.

## **РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЙОНОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВОГО РАДИОЭХА ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ**

**Инюхин В. С., Кущев С. А., Лиев К. Б., Макитов В. С.**

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Одним из наиболее опасных стихийных бедствий северокавказского региона являются интенсивные градобития, которые наносят большой ущерб сельскому хозяйству, приводя, зачастую, к сокращению или гибели урожая агропромышленных культур. Синоптические условия здесь формируются под воздействием общей циркуляции атмосферы и местных факторов,

обусловленных орографическими особенностями региона [1]. Расположение района в сложных физико-географических условиях, близость бассейна Черного моря, лежащего на пути западных вторжений, часто формирует неустойчивую воздушную массу с повышенным увлажнением, что способствуют активизации конвективных процессов в теплый период года. К числу региональных особенностей следует отнести: частный орографический циклогенез в районе Теберды и Северной Осетии, выход южных циклонов со Средиземного моря, сильный прогрев подстилающей поверхности с различной экспозицией склонов и т. д. Повышенная градоопасность территории объясняется также близостью Главного Кавказского хребта, задерживающего продвижение атмосферных фронтов[2].

Для мониторинга распределения ущерба от града по территории сельскохозяйственного землепользования важное значение имеет детальная информация о зонах наиболее вероятного зарождения градовых облаков, траекториях их дальнейшего перемещения и районах, наиболее подверженных интенсивным градобитиям. Наиболее перспективным подходом для решения этих вопросов является проведение многочасовых непрерывных радиолокационных наблюдений грозоградовых процессов с использованием автоматизированных систем сбора, обработки и анализа радиолокационной информации. В связи с этим, основной целью данной работы является проведение районирования центральной части Северного Кавказа по местам зарождения градовых облаков (регистрации первого радиоэха) и анализ географических особенностей выявленных областей.

Основу экспериментального материала, используемого в работе, составили данные, полученные с помощью метеорологического радиолокатора МРЛ-5, расположенного на научно-исследовательском полигоне Высокогорного геофизического института (НИП ВГИ). Территория наблюдений за градовыми облаками, находящаяся в радиусе обзора радиолокационной станции ВГИ, включает Кабардино-Балкарскую республику, юго-восток Ставропольского края и западные районы РСО-Алания. Радиолокационные исследования проводились в период с 2009 по 2014 г. Для более детального анализа территория наблюдений была разделена на квадраты 10\*10 км. Анализ радиолокационных данных включал выявление облаков с выпадением града, и точное определение места регистрации их первого радиоэха. Всего за период с 2009-2014 гг. было проанализировано 392 градовые ячейки. Все эти данные были занесены в специализированную программу Field, с помощью которой были построены карты распределения мест зарождений градовых ячеек на исследуемой территории.

В данной работе мы рассматриваем отдельные градовые ячейки всех известных типов градовых процессов (однойчейковых, многоячейковых упорядоченных, многоячейковых неупорядоченных, суперячейковых и процессов переходного типа). Как известно, суперячейковые и большинство многоячейковых процессов Северного Кавказа формируется в горной



зоне, в основном в междуречье верховий Кубани и Малки, на границе Кабардино-Балкарии и Карчаево-Черкессии [3,4]. Этот факт базируется на результатах исследований, проведенных в семидесятых-восемидесятых годах прошлого века.

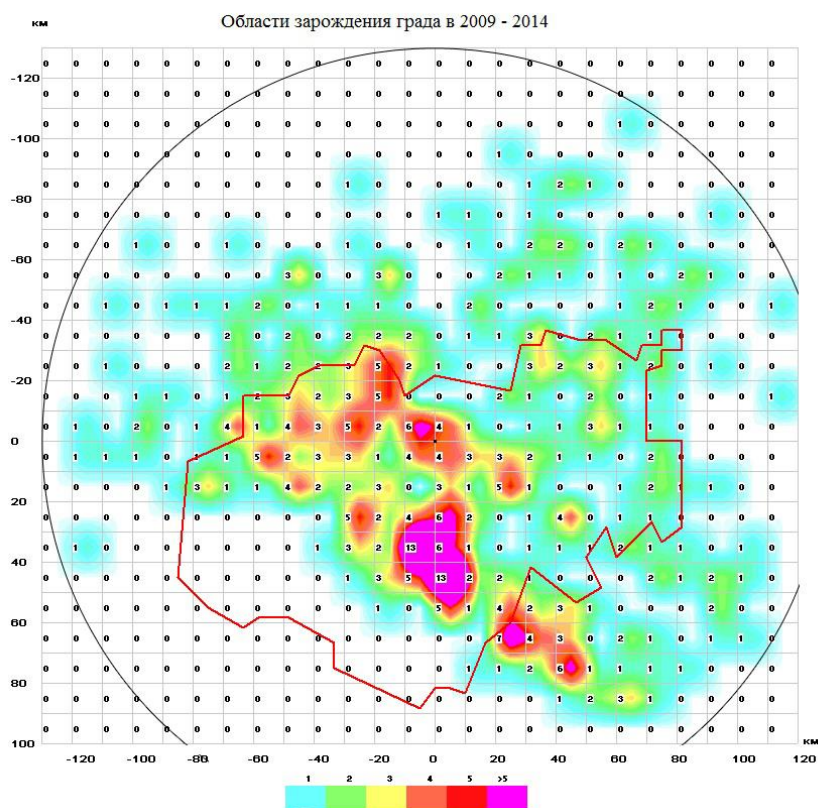


Рис. 1. Распределение зон зарождения градовых ячеек по территории исследования в период с 2009 – 2014 годы. Показана сетка 10\*10 км. Деления шкалы соответствуют числу градовых ячеек, зарегистрированных в данном квадрате. Контуром на рисунке показаны границы Кабардино-Балкарской республики.

Там же отмечено, что области регистрации первого радиоэха градовых ячеек варьируются от года к году. При этом второй максимум располагается обычно в центральной части Кабардино-Балкарии. Результаты анализа радиолокационных данных показывают, что за исследуемый период большая часть градовых процессов сформировались в междуречье Чегема и Черка Балкарского.

Как видно из рис.1, на территории исследования существует несколько зон с более частым зарождением градовых облаков. В основном эти зоны находятся на северо-западе, в центре, юге и юго-востоке исследуемой территории. Основной очаг зарождения расположен в междуречье Чегема и Черка Балкарского, на этот очаг приходится большинство зарождений градовых ячеек центральной части Северного Кавказа. Как было отмечено ранее, это один из двух основных очагов зарождения градовых ячеек наряду с междуречьем Кубани и Малки. Количество ячеек, формирующихся в этих двух очагах, варьируется от года к году. В частно-

сти, в конце прошлого столетия более активным был западный очаг. Именно с ним были связаны интенсивные градобития южной части Ставропольского края и Кабардино-Балкарии. В начале 21 века более активно выглядит восточный очаг. Однако следует отметить, что в дни с интенсивной конвекцией встречаются случаи, когда оба очага активны в один и тот же день [5].

Как известно, сильное влияние на развитие градовых ячеек, особенно на начальной стадии, оказывает орография местности.

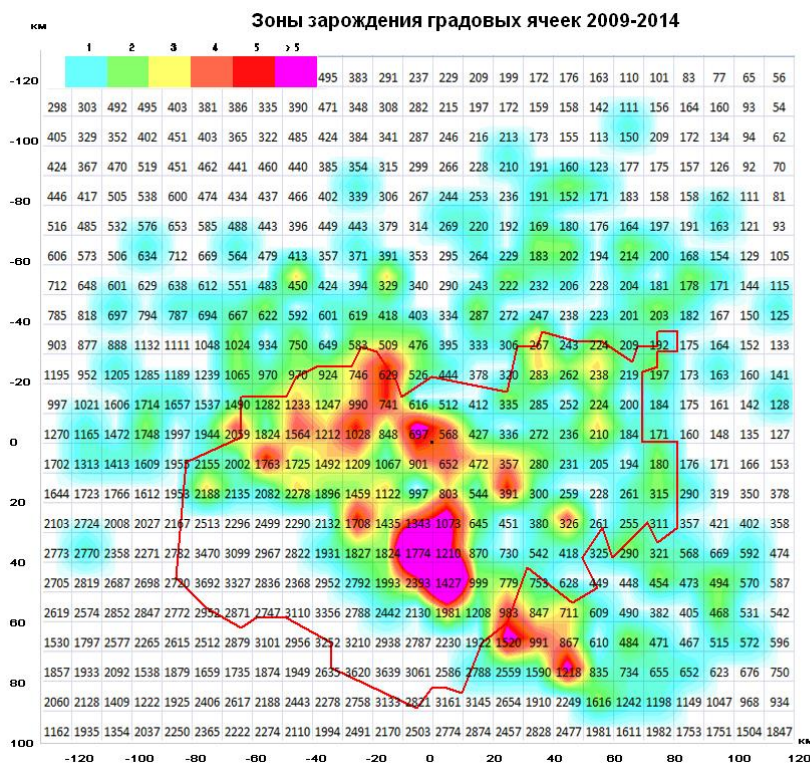


Рис.2. Распределение зон зарождения градовых ячеек по территории исследования в период с 2009 – 2014 годы. Показана сетка 10\*10 км с указанием высот подстилающей поверхности. Деления шкалы соответствуют числу градовых ячеек, зарегистрированных в данном квадрате.

Сложный рельеф территории исследования с перепадами высот от 50 до 5000 м, различный характер подстилающей поверхности и ее сильный прогрев в летний период создают благоприятные условия для формирования градовых облаков. Результаты анализа высот подстилающей поверхности в зонах зарождения градовых ячеек приведен на рис. 2. В каждом квадрате 10\*10 указана его средняя высота.

Расчет осредненных высот подстилающей поверхности внутри каждого квадрата и распределения средних высот по территории был произведен с помощью программы AvgHeight. Рис. 2 наглядно показывает, что основной максимум зарождения градовых ячеек расположен над квадратами с высотами приблизительно от 1000 до 2000 м. При этом подавляющее боль-

шинство ячеек зарождается в горных и предгорных районах. В то же время, число ячеек, зародившихся над равнинными районами незначительно. Именно в равнинной части территории расположены и, так называемые, «нулевые квадраты», т.е. квадраты, над которыми не зарегистрировано зарождения ни одной градовой ячейки.

Однако наиболее информативным в этом плане выглядит полное распределение всех ячеек по высотам подстилающей поверхности, над которыми было зарегистрировано их первое радиоэхо. На рис.3 приводятся два таких распределения.

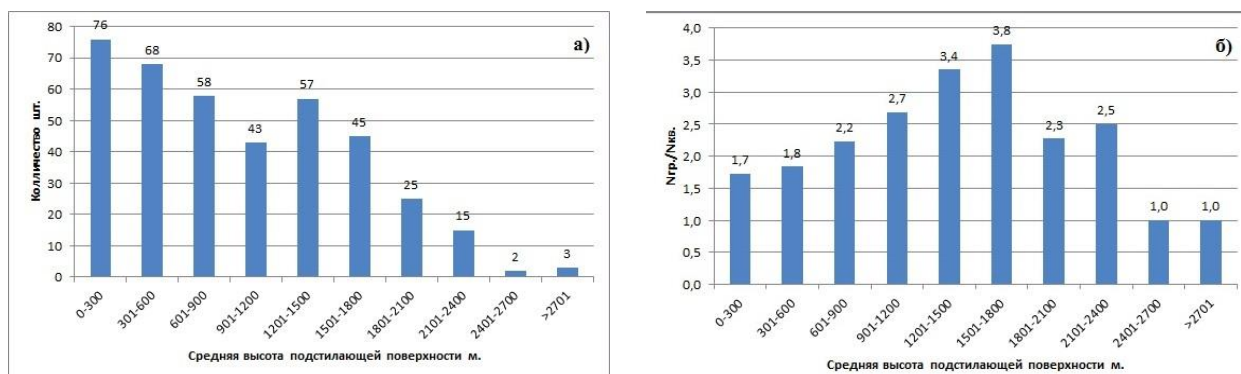


Рис. 3. Распределения градовых ячеек по высотам подстилающей поверхности, над которыми было зарегистрировано их первое радиоэхо: а) распределение с учетом всех выделенных квадратов; б) приведенное распределение с учетом отношения случаев зарождения града над данным квадратом к общему числу квадратов с этой высотой.

Следует отметить, что распределение высот в районе исследования неравномерно. Равнинные районы с небольшой средней высотой над уровнем моря и низкой градовой активностью преобладают над предгорными и горными районами с большей градовой активностью. В связи с этим первое распределение можно считать несколько искаженным из-за большого числа квадратов в равнинной части площади обзора, поэтому имеет смысл рассмотреть приведенное распределение, где используется отношение числа случаев зарождения града на данной высоте к общему числу квадратов с этой высотой.

Как видно из рис.3, первое распределение имеет максимум на минимальных высотах. Сопоставление рис. 2 и 3, показывает, что это связано с большим числом квадратов с высотами до 300 м, над которыми отмечалось в основном зарождение одной градовой ячейки. Максимум второго (приведенного) распределения приходится на высоты 1500-1800 м. Именно второе распределение в большей степени соответствует результатам, приведенным на рис. 2. Информативна и сама форма этого распределения, поскольку в данном случае речь может идти только об одном модальном распределении, которое показывает диапазон высот подстилающей поверхности, наиболее благоприятный для формирования первого радиоэха градовых облаков.

Исходя из результатов, представленных на рис. 2 и 3 большинство градовых ячеек формируется в зоне с высотами подстилающей поверхности от 900 до 2400 м.

Следует иметь в виду, что Большой Кавказ представляет собой горную цепь из нескольких параллельных хребтов, вытянутых с северо-запада на юго-восток. Главный Кавказский хребет, отделяющий территорию Северного Кавказа от Закавказья, в своей средней части имеет ряд вершин (Шхара, Джанги-Тау, пик Пушкина и т.д.), превышающих 5000 м. Параллельно Главному Кавказскому хребту на расстоянии от 3 до 11 км расположен боковой хребет. В Боковом хребте расположены более значительные пятитысячники: Дых-Тау (5204 м), Коштан-Тау (5152 м) и Эльбрус (5642 м). Северо-восточнее Бокового хребта расположен Скалистый хребет, отделенный от Бокового северной депрессией шириной до 13 км. Абсолютные отметки Скалистого хребта значительно превышают 2000 м (Кара-Кая достигает высоты 3629 м). На севере к Скалистому хребту примыкает средневысотная гряда Пастбищного хребта (1800-2650 м), который по сложению и строению подобен Скалистому хребту. К Пастбищному примыкает Лесистый (Меловой) хребет, максимальная высота которого (Сарай-гора) достигает 1327 м. Для всех перечисленных хребтов характерным является обрывистость южных склонов при пологих северных. Вся горная система расчленена глубокими каньонами горных рек, переходящими в предгорной части в более широкие долины. Это создает определенные особенности в условиях обтекания воздушными массами горных цепей. Наложив карту зон зарождения градовых ячеек на физико-географическую карту северной части Центрального Кавказа (рис.4), можно увидеть, что выделенные зоны почти идеально совпадают с границами Скалистого, Пастбищного и Лесного хребтов.

Рис. 4 наглядно иллюстрирует, что наиболее благоприятными зонами для формирования градовых облаков в центральной части Северного Кавказа являются северные склоны Скалистого хребта. Именно здесь расположены основные максимумы повторяемости регистрации первого радиоэха градовых ячеек. Экспозиция северных склонов Скалистого хребта наиболее благоприятна для термической конвекции при прогреве подстилающей поверхности в летний период. Кроме того, одним из дополнительных факторов для интенсификации начальной конвекции над этими районами является эффект натекания воздушной массы при северном и северо-западном вторжении. Вторая группа очагов расположена над Пастбищным и Лесным хребтами. При этом необходимо иметь в виду, что первое радиоэхо конвективных облаков регистрируется и над Главным Кавказским хребтом, но в этих облаках в дальнейшем град не индицируется. Именно поэтому южная граница выделенных зон практически совпадает с линией вершин Скалистого хребта.

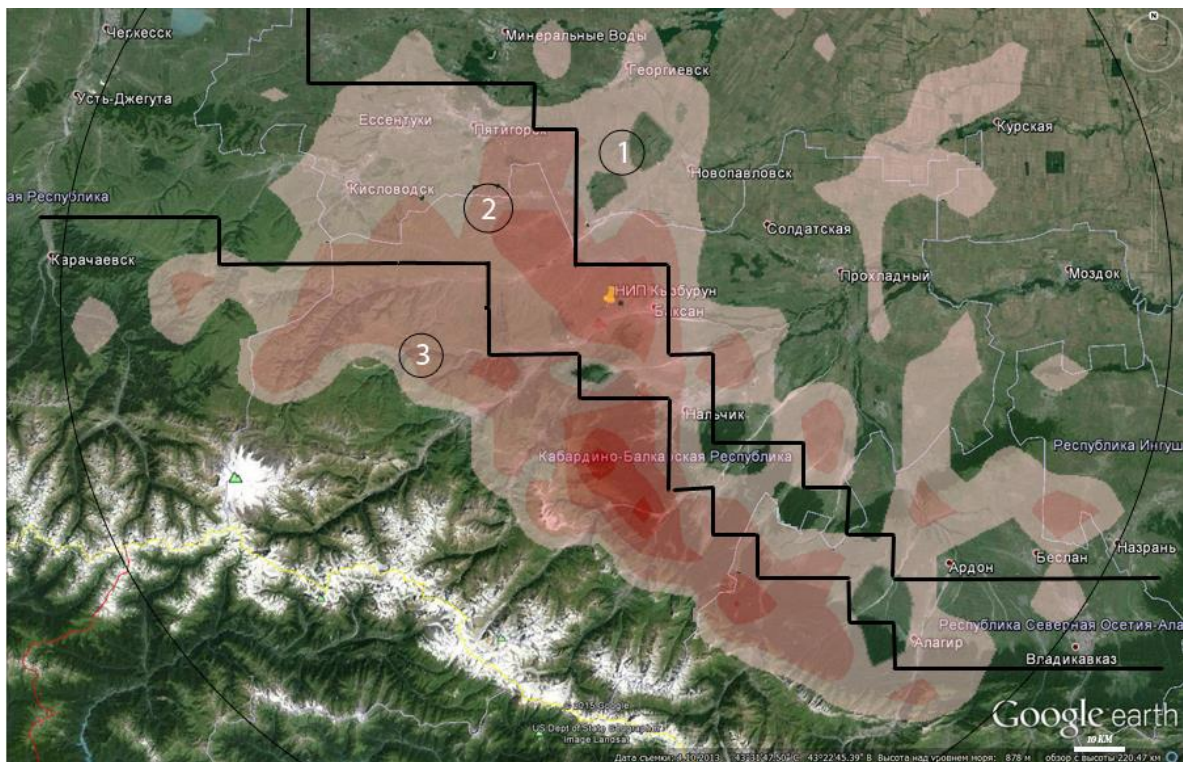


Рис. 4. Зоны зарождение градовых ячеек в период с 2009-2014 годы на фоне рельефа центральной части Северного Кавказа.

На рис. 4 приведена обобщенная схема зон зарождения первого радиозаха градовых ячеек на фоне физической карты центральной части Северного Кавказа. Вся территория исследования условно разделена на 3 зоны зарождения. Первая зона - это южная часть Ставропольского Края, равнинная часть Кабардино-Балкарии и Северной Осетии. Вторую зону образуют Джинальский хребет вместе с Лесистым хребтом и предгорной частью Кабардино-Балкарии. Третья зона – от Главного Кавказского хребта до среднегорья, где зоны зарождения градовых облаков в основном разместились над Скалистым и Пастбищным хребтами (Нижне-Чегемское плато и Шауханское плато). На первую зону приходится 32,9 % зарождений исследуемых градовых облаков, на вторую 28,3 % и на третью 38,8 %. Другими словами, над предгорными и горными районами центральной части Северного Кавказа (зоны 2 и 3) формируется около 70% градовых облаков.

Как было отмечено ранее, динамика развития градовых процессов Северного Кавказа предполагает выход отдельных ячеек на равнинную часть региона по различным траекториям.

Как было отмечено выше, анализ траекторий отдельных ячеек суперячейковых и многоячейковых градовых процессов в семидесятые-восьмидесятые годы прошлого столетия достаточно подробно представлен в [3,4]. Результаты аналогичных исследований для провинций Мендоса (Аргентина) и Альберта (Канада) приводятся в [6,7]. В указанных работах построены векторные карты-схемы траекторий градовых ячеек, позволяющие восстановить общую картину градоопасности региона. Одной из задач данного исследования является количественная оценка распределения траекторий градовых ячеек, соответствующих выделенным зонам зарождения

первого радиозоха. На рис. 5 приводится распределение направлений перемещения отдельных градовых ячеек для каждой из рассмотренных выше зон зарождения первого радиозоха[8].

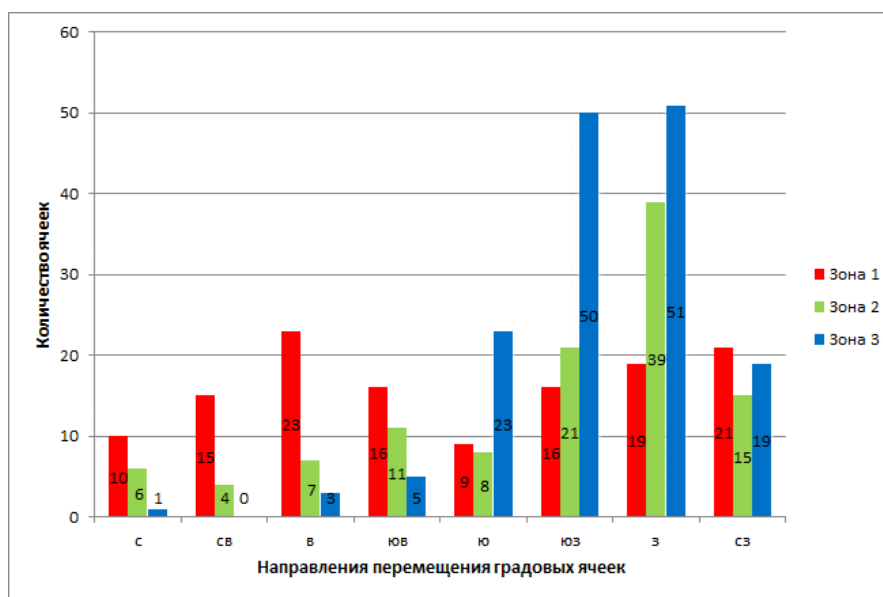


Рис.5. Распределение направлений перемещения отдельных градовых ячеек центральной части Северного Кавказа для каждой выделенной зоны зарождения первого радиозоха.

Из рис. 5 следует, что в первой зоне зарождения облака перемещаются в различных направлениях, фактически в равных пропорциях. Для второй зоны преимущественны юго-западное, западное и северо-западное направления. Причем ярко выраженный максимум для этих ячеек приходится на западные направления. Для третьей зоны характерно отсутствие северо-восточных направлений, а максимальное количество перемещений градовых облаков наблюдаются с запада и юго-запада.

В заключение следует отметить:

1. В результате проведенного исследования проанализированы 392 градовые ячейки и выявлены преимущественные зоны зарождения их первого радиозоха. Показано, что наиболее благоприятные условия для формирования градовых ячеек наблюдаются на северных склонах Скалистого хребта. Именно здесь расположены основные максимумы повторяемости регистрации первого радиозоха градовых ячеек. Вторая группа очагов расположена над Пастбищным и Лесистым хребтами.

2. Выявлен диапазон высот подстилающей поверхности, наиболее благоприятный для формирования первого радиозоха градовых облаков. Показано, что большинство градовых ячеек формируется в зоне с высотами подстилающей поверхности от 900 до 2400 м.

3. Построена обобщенная схема зон зарождения первого радиозоха градовых ячеек центральной части Северного Кавказа. Первая зона - это южная часть Ставропольского Края, рав-

нинная часть Кабардино-Балкарии и Северной Осетии. Вторую зону образуют Джинальский хребет вместе с Лесистым хребтом и предгорной частью Кабардино-Балкарии. Третья зона – от Главного Кавказского хребта до среднегорья, где зоны зарождения градовых облаков в основном разместились над Скалистым и Пастбищным хребтами (Нижне-Чегемское плато и Шауханское плато). На первую зону приходится 32,9 % зарождений исследуемых градовых облаков, на вторую 28,3 % и на третью зону 38,8 %. Другими словами, над предгорными и горными районами центральной части Северного Кавказа (зоны 2 и 3) формируется около 70% градовых облаков.

4. Определены количественные характеристики направлений перемещения градовых ячеек для каждой из выделенных зон. Для первой зоны характерно перемещение градовых ячеек в различных направлениях, фактически в равных пропорциях. Для второй зоны преимущественны юго-западное, западное и северо-западное направления с ярко выраженным максимумом западных направлений. Для третьей зоны характерно отсутствие северо-восточных направлений, а максимальное количество перемещений градовых облаков наблюдаются с запада и юго-запада.

### ***Список литературы***

1. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова. Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. – М.: Гидрометеоздат, 1991. – С. 32-48
2. Барекова М.В. Влияние факторов макро- и мезомасштабной циркуляции на интенсивность градовых процессов в регионе Кавказа // Тр. ГМЦ, 1990. Вып. 308. С.101-108.
3. Газаева З.А., Макитов В.С. Распределение траекторий перемещения многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ, 1991. Вып. 80. С.93-99.
4. Барекова М.В., Газаева З.А., Макитов В.С. Характерные траектории суперячейковых градовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ. 1999. Вып. 90. С.80-95.
5. M.V.Barekova, V.S. Makitov Analysis of synoptic conditions of hail clouds development and some possibilities of nowcasting of storm's tracks.// 4-th European Conference of Severe Storms. 10-14 September 2007, Trieste, Italy.
6. D. Rosenfeld, W.L. Woodley, T. W. Krauss, V.S. Makitov Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorms feeder clouds in Argentina.// Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006, vol. 45, pp. 1261-1281.
7. T.W. Krauss, Alberta Hail Suppression Project 2008 Field Program Final Report // Weather Modification Inc. for Alberta Severe Weather Management Society, October 2008, Calgary, 133 pp.
8. Инюхин В.С., Чередник Е.А., Макитов В.С. Куцев С.А. Динамические характеристики отдельных градовых ячеек центральной части Северного Кавказа по данным радиолокационных наблюдений.// Труды ВГИ Вып. 99 С. 41-51.

## О КОНТРОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА И ДИАГНОЗА ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ

Михайловский Ю.П.<sup>1</sup>, Синькевич А.А.<sup>1</sup>, Абшаев А.М.<sup>2</sup>, Аджиев А.Х.<sup>2</sup>, Кашлева Л. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург; <sup>2</sup> ФГБУ ВГИ, г. Нальчик

<sup>3</sup> РГГМУ, г. Санкт-Петербург

### Введение

Электрические явления в облаках принадлежат к числу наиболее опасных явлений погоды (ОЯП) как для самолетов и других летательных аппаратов, размеры и насыщенность электронными системами которых непрерывно растет, так и для наземных объектов, для которых представляют опасность как токи молний, так и их мощное электромагнитное излучение. Для изучения электрических процессов в облаках в настоящее время используются как прямые, так и дистанционные радиофизические методы и средства: самолеты, зонды, метеорологические радиолокаторы (МРЛ) и различные грозопеленгаторы, грозорегистраторы [1,3,4,5,7,8, 9,10]. С их помощью детектируется и прогнозируется электрическое состояние облака, определяется перемещение грозовых очагов и оценивается «грозоопасность» мощных кучево-дождевых облаков с помощью вероятностно-статистических «критериев грозоопасности» [5,8,9]. Однако, выполненный в 80-х годах анализ показал, что более чем в 80% случаев, поражения самолетов молниями происходило в облаках, которые не классифицировались как грозовые [5,11]. Позднее выяснилось, что собственный электрический заряд самолета, искажение самолетом электрического поля облака, сильно ионизованные струи двигателей или разрядников самолета могут спровоцировать появление электрических разрядов «облако – самолет» в облаках, которые вообще не дали бы разряда, не влети в них самолет [5,11]. В то же время, электрическое состояние облака (ЭСО) (плотность объемных зарядов, напряженность электрического поля) должно быть таким, чтобы «спровоцированный» разряд мог развиваться. Обнаружение таких облаков, потенциально готовых к разряду молний, но еще не грозящих, с помощью стандартных технических средств, регистрирующих радиоизлучение молний, невозможно. Существующие вероятностно-статистические радиолокационные критерии грозоопасности также мало пригодны для этих целей, так как они построены на экспериментальных исследованиях мощных грозовых облаков [5,9]. Таким образом, существует практическая необходимость совершенствования технологий диагноза и сверхкраткосрочного прогноза электрического состояния облаков (ЭСО) как на грозовой, так и на предгрозовой стадии развития с помощью дистанционных радиофизических методов. Проведение этой работы невозможно без совершенствования методов прямого контроля ЭСО на всех стадиях развития облака.



## 1. Контроль электрического генератора облака по результатам измерений напряженности электрического поля

ЭСО однозначно характеризуется распределением зарядов или токов в облаке и вокруг него и вариациями этого распределения во времени и пространстве. Это распределение также однозначно связано с распределением вектора напряженности электрического поля ( $E$ ) в том же объеме, которое является прямой интегральной характеристикой всей совокупности заряженных частиц в облаке и вблизи его. Понятно, что получение этих характеристик с достаточной полнотой практически нереально. Более того, отдельные фрагменты этих распределений могут оказаться малоинформативными с точки зрения обобщенной характеристики ЭСО и его электрического генератора, хотя сложности получения такой информации весьма значительны. И дело тут не только в возможности серьезных ошибок при внутриоблачных измерениях  $E$  [5]. Сильная зависимость получаемой информации от расположения траектории в облаке может сильно затруднить выделение на этом фоне общих закономерностей изменения ЭСО. С этих позиций более информативными, на наш взгляд, и, несомненно, существенно более простыми являются измерения  $E$  вне облака [5].

Вне облака  $E$  в каждой точке пространства является суперпозицией полей всех зарядов в облаке и вне его с учетом проводимостей в атмосфере и облаке. В этом смысле она оптимальна. С другой стороны получаемый набор значений  $E$  зависит от взаиморасположения облака и траектории пролета и его интерпретация достаточно сложна. Правомерны попытки решения «обратной» задачи и получения искомого распределения зарядов на основе измеренных значений  $E$  [2,6]. Задача восстановления реальной структуры зарядов, создающих измеренные значения вектора  $E$  вне облака, в общем случае некорректна. Однако, существующие представления о распределении зарядов в облаках в виде 2 - 3 однородно заряженных сферидов, расположенных один над другим, позволяют надеяться на успешное решение. Окончательный ответ на вопрос о возможности восстановления реальной электрической структуры по измерениям  $E$  вне облака может быть получен только в результате апробации метода и программ на реальных облаках. На данном этапе их можно рассматривать как методы и программы «параметризации» измеряемого электрического поля, которое непосредственно определяется величиной и структурой зарядов в облаке и измеряется прямыми методами с высокой точностью. При параметризации мы заменяем всю совокупность измеренных значений  $E$  несколькими числами, что значительно упрощает возможности работы с ними. При этом мы также избавляемся от зависимости получаемых параметров от взаиморасположения облака и траектории полета самолета. Получаемым характеристикам можно пытаться придавать опре-

деленный физический смысл. В частности, можно считать, что дипольный момент характеризует мощность эквивалентного электрического генератора облака. А именно эта характеристика и интересует нас для прогноза и диагноза ЭСО и мощности электрического генератора.

### 1.1. Восстановление электрической структуры облаков по наземным измерениям E

Первые попытки получения информации о структуре зарядов в облаке по данным о напряженности электрического поля предпринимались на основе наземных измерений E под облаком. Именно на основе таких измерений было выдвинуто предположение, что облако является диполем. Принципиально возможно развертывание наземных систем контроля напряженности поля и восстановление электрической структуры проходящих над системой датчиков облаков. Наиболее серьезным недостатком подобных систем является тот факт, что при прохождении развитого в электрическом смысле облака на земле начинают коронировать различные острия [3]. И очень изменчивое поле образующихся коронных разрядов может «экранировать» поле зарядов облака. Кроме того, облако перемещается над датчиками с относительно небольшой скоростью и его электрическая структура может существенно измениться за время перемещения. Модернизацией подобной системы является система контроля, основанная на измерениях скачков (изменений) напряженности электрического поля (dE) при разрядах молний [3]. В этом случае устраняется экранирующее действие объемных зарядов коронирующих острий и появляется возможность временной идентификации молний и даже отдельных компонент. В алгоритме могут быть заложены различные варианты расчетной модели разряда, как для разрядов «облако – земля», так и для разрядов «облако – облако» и внутриоблачных. В зависимости от вида разряда меняется количество неизвестных ( $Q_i, r_i$ ) и, соответственно, минимальное количество пунктов, в которых должны измеряться dE.

$$dE_j = F_i(Q_i, r_i) \quad (1)$$

где:  $F_i$  – функция, зависящая от вида разряда;

$dE_j$  – величина скачка напряженности поля, измеренная j-м датчиком;

$Q_i$  – нейтрализованный облачный заряд, расположенный в точке с координатами  $r_i$ .

Учитывая погрешности измерения  $dE_j$  и их влияние на устойчивость точного решения системы уравнений (1), можно сформулировать задачу расчета  $Q_j$  и  $r_i$  как:

$$\min \Phi(r_i, Q_i, ) = \min \sum_j \left| E_j - \sum_{i=1}^n Q_i \frac{r_j - r_i}{|r_j - r_i|^3} \right|^2 \quad (2)$$

В этом случае представляется целесообразным использовать принципы и методы, предлагаемые в [2,3,6].

## 1.2. Восстановление электрической структуры облака по самолетным измерениям $E$

Во время каждого пролета самолета над или рядом с облаком мы получаем распределение вектора  $E$ , величина и форма которого определяются структурой зарядов в облаке в предположении, что структура зарядов существенно не меняется за время пролета (2-4 мин.) (Рис. 1). При этом обычно используется электростатическое приближение, но возможно сформулировать задачу и в терминах токовых источников.

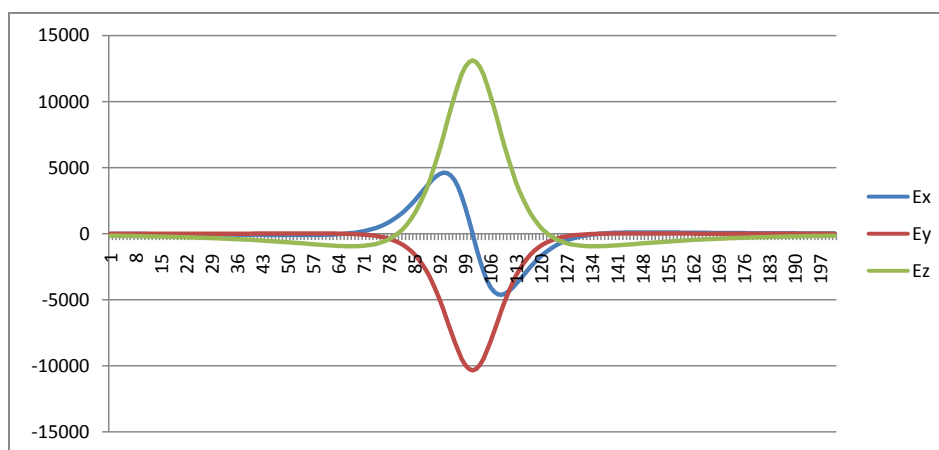


Рис.1. Изменение составляющих напряженности электрического поля при пролете самолета вблизи электризованного облака ( $E(l)$ ).

Непосредственная интерпретация  $E(l)$  является затруднительной вследствие ее зависимости от геометрии траектории и ее расположения относительно облака.

В рамках электростатических представлений электрическое состояние облака и его окрестности полностью характеризуется полями вектора напряженности электростатического поля -  $E(\mathbf{r})$  и плотности заряда -  $\rho(\mathbf{r})$ . При условии ограниченности в пространстве области  $\Omega$  между  $E(\mathbf{r})$  и  $\rho(\mathbf{r})$  существует связь в виде интеграла Пуассона, которая позволяет однозначно вычислить  $E(\mathbf{r})$  в произвольной точке пространства при известной  $\rho(\mathbf{r})$  в  $\Omega$ . Обратное оказывается неверным - знание распределения  $E(\mathbf{r})$  вне области  $\Omega$  не позволяет однозначно определить  $\rho(\mathbf{r})$  внутри  $\Omega$ . Другими словами, существует множество различных распределений плотности заряда  $\rho(\mathbf{r})$  в области  $\Omega$ , которые создают одинаковое электростатическое поле  $E(\mathbf{r})$  вне этой области. Несмотря на это, все распределения имеют близкие первые мультипольные моменты относительно некоторой фиксированной точки  $\mathbf{r}_0$ , которые можно определять по любому найденному представителю. С учетом зеркального отражения от поверхности земли система зарядов является нейтральной в целом, вследствие чего дипольный момент системы не зависит от выбора  $\mathbf{r}_0$  и имеет только вертикальную составляющую. Это обстоятельство делает дипольный момент наиболее важной и практически единственной

надежно определяемой характеристикой системы зарядов при отсутствии дополнительной информации о  $\rho(r)$  [2, 6], которая и может служить числовой характеристикой мощности электрического генератора облака.

Постановка задачи принципиально похожа на (2). Под синтезом системы источников будет подразумеваться построение системы точечных зарядов, приближающих измеренное поле в смысле:

$$\min F(r_i, Q_i) = \min \int_{(l)} \left| E(l) - \sum_{i=1}^n Q_i \frac{r(l) - r_i}{|r(l) - r_i|^3} \right|^2 dl \quad (3)$$

Таким образом, синтез сводится к минимизации  $F(r_i, Q_i)$  по переменным  $r_i, Q_i$ . Функция квадратична по переменным  $Q_i$ , что позволяет уменьшить число переменных с  $4n$  до  $3n$ , тем не менее, задача минимизации даже при сравнительно небольших  $n$ , хотя и разрешима в принципе, но трудна для численного решения. Проблема заключается как в выборе начального значения  $r_i, Q_i$ , так и в выборе эффективного алгоритма для его уточнения. Представляется интересным подход, предложенный в [6]. При этом последовательно решается несколько более простых задач, приближающих нас к решению (3). Этими задачами соответственно являются:

- Синтез центрально-симметричной системы.

В данном случае (3) примет вид:

$$\min F(r_i, Q_i) = \min \int_{(l)} \left| \bar{E}(l) - Q \frac{r(l) - r_0}{|r(l) - r_0|^3} \right|^2 dl \quad (4)$$

- Синтез системы, обладающей осевой симметрией.

Для системы, «мало» отличающейся от осесимметричной, естественно потребовать определения «наилучшей» оси в смысле

$$\min F(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \min \int_{(l)} (\bar{E}(l), [\vec{r}(l) - \vec{r}_1, \vec{r}(l) - \vec{r}_2])^2 dl \quad , \quad (6)$$

где:  $r_1, r_2$  – произвольные точки на оси системы.

- Синтез точечного диполя.

Окончательно для центра диполя  $\vec{r}_d$

$$\vec{r}_d = \vec{r}_0 + \vec{p} \frac{\int_{(l)} (\vec{r}(l) - \vec{r}_0, [\vec{n}(l), [\vec{p}, \vec{n}(l)]]) dl}{\int_{(l)} [\vec{n}(l), \vec{p}]^2 dl} \quad (7)$$

Осталось определить последний неизвестный параметр диполя – величину дипольного момента  $P$  из условия

$$\min_{\{P\}} \int_{(l)} \left| \vec{E}(l) - P \frac{3(\vec{p}, \vec{n}(l))\vec{n}(l) - \vec{p}}{|\vec{r}_d - \vec{r}(l)|^3} \right|^2 dl \quad (8)$$

Представленный метод и алгоритм параметризации был исследован на численной модели, в которой по заданным распределениям зарядов в облаке рассчитывалась  $E$  на траектории полета, в рассчитанные значения  $E$  вносились погрешности, близкие к реально существующим, и по этим, квази-реальным значениям  $E$  восстанавливалась электрическая структура, задаваемая в начале [2]. Проведенные исследования показали высокую устойчивость дипольного момента как к вариации зарядовой структуры, так и к вносимым погрешностям. Для «простых» распределений хорошо восстанавливалась и сама структура зарядов.

## **2. Контроль электрического генератора облака по результатам измерений параметров молниевой активности**

В настоящее время наблюдается бурное развитие систем контроля молниевой активности грозовых облаков [1]. Наиболее широко распространены, по-видимому, так называемые, гиперболические системы, использующие разность времен прихода электромагнитного излучения в различные пункты регистрации. К таковым относятся, например, развертываемая в Росгидромете система «Алвес», длинноволновая часть системы LS8000 и всемирная система WWLND. Специфика этих систем такова, что оптимальные результаты получаются при регистрации разрядов, имеющих максимальный градиент и минимальную длительность изменения тока в канале. Эти условия наблюдаются обычно во время «главной стадии» («возвратный удар») первой компоненты молнии «облако – земля» (О-3). Грозопеленгатор LS8000 позволяет [1,14] определять координаты и другие параметры молний на основании радиоизлучения от электрических разрядов в двух диапазонах длин волн VHF=Very High Frequency range (110–118 МГц), и LF=Low Frequency range (1–350 кГц). В LF диапазоне используется комбинированная технология, включающая использование данных магнитной пеленгации и разности времен прихода электромагнитного излучения в различные пункты («time-of-arrival technology», гиперболический метод). В VHF диапазоне используется технология УКВ интерферометрии. Согласно частотным диапазонам и используемым технологиям при интерпретации результатов измерений считается, что в LF диапазоне регистрируется около 30% молний (flashes) типа «облако–облако» и молнии типа «облако–земля», а в VHF диапазоне - все разряды (strokes), включая внутриоблачные [1,14].

Мощность электрического генератора, понимаемая как величина генерируемых облачных зарядов и создаваемое ими электрическое поле ограничиваются процессами диссипации зарядов облака, основными из которых, по-видимому, являются разряды молний различной

мощности и протяженности [5,9,10,12]. Другие возможные механизмы диссипации (токи проводимости в атмосфере и в облаке, турбулентное перемешивание, токи коронирования на земле и внутри облаков и другие) почти не исследованы. Хотя Имянитов на основании времен восстановления  $E$  внутри облаков считал, что электрический генератор в существенной степени короткозамкнут, т.е. значительная часть генерируемой энергии расходуется на внутренние потери не связанные с разрядами. На данном этапе мы считаем, что эти механизмы не играют решающей роли в балансе токов внутри грозового облака и частоты и токи молний являются репрезентативными характеристиками электрического генератора облака. К сожалению, используемая версия LS8000 не позволяет получать оценки токов внутри- и межоблачных разрядов. Мощность генератора в этом случае можно оценивать по току или даже заряду молний  $O-3$  плюс частота молний  $O-O$  и  $VO$ .

### **3. Контроль электрического генератора облака по результатам измерений радиолокационных параметров**

В настоящее время большинство исследователей основным механизмом генерации зарядов считает взаимодействие ледяных частиц [4,7,9,10,12,13]. В соответствии с этим значительные усилия были направлены на определение связей между частотой разрядов и радиолокационными параметрами, зависящими от количества и размера ледяных частиц в облаке [7,8,9,10,12]. Были получены различные регрессионные связи частот молний с этими параметрами, с различной статистической обеспеченностью и достоверностью [9,10,12].

Представляется перспективным использование новых радиолокационных параметров, характеризующих количество и размеры крупных ледяных частиц [5,9].

Таким образом, в случае отсутствия систем прямого контроля молниевой активности появляется возможность контроля электрического генератора косвенными радиолокационными методами. Одним из достоинств этих методов является возможность их использования для контроля электрического генератора на предгрозовой стадии.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 16-05-00197\_a, 15-05-05719\_a, 17-55-80048 БРИКС\_a, 17-05-00965\_a.

#### ***Список литературы***

1. Аджиев А. Х., Стасенко В. Н., Тапасханов В. О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе.- Метеорология и гидрология, 2013, № 1, с. 5—11.
2. Анискина О.Г., Михайловский Ю. П., Пачин В.А. О расчете параметров, характеризующих электрическое состояние облаков по измерениям напряженности электрического поля. 4 ВС. симпозиум по Атм. Эл-ву, Нальчик, с. 13-14, 1990.

3. Богачук В.С., Михайловский Ю.П., Об определении координат и величины зарядов, нейтрализуемых в разрядах молнии. 3 Вс. Симпозиум по Атмосферному электричеству, Тарту, 1986, с.157
4. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Геккиева Ж.М. Изменение грозовой активности облаков при активных воздействиях на град. - Доклады Всероссийской открытой конференции по АВ на гидрометеорологические процессы. Ч.2, 2015г.
5. Михайловский Ю.П. Дистанционные исследования электризации конвективных облаков радиофизическими методами с использованием самолетов. Сборник «Вопросы радиометеорологии», посвященный 90 - летию со дня рождения В.Д. Степаненко, ВКА им. А.Ф. Можайского, С- Петербург, 2013, с.238-252.
6. Пачин В.А. К оценке параметров электрического состояния облаков по данным о напряженности электрического поля. - Труды ГГО, вып.474, 1984 г., с. 38-46
7. Синькевич А. А., Михайловский Ю.П., Довгалюк Ю. А. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов.— Метеорология и гидрология, 2016, № 9, с. 27—40.
8. Степаненко В.Д., Гальперин С.М. Радиотехнические методы исследования гроз. Л.: Гидрометеиздат, 1983. -204с.
9. Михайловский Ю. П., Синькевич А. А., Павар С. Д. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков. — Метеорология и гидрология, 2017, № 6, с. 31—45.
10. Futyan J. M. and Del Genio A. D. Relationships between lightning and properties of convective cloud clusters. — Geophys. Res. Lett., 2007, vol. 34, L15705, pp. 1—5.
11. Mazur V. Lightning Initiation on Aircraft in Thunderstorm. Proc. 8th Intern. Conf. Atmosph. Electricity. Uppsala. 1988. p.347-357.
12. Pessi A. T. and Businger S. Relationships among lightning, precipitation, and hydrometeor characteristics over the North Pacific Ocean. — J. Appl. Meteorol. Climatol., 2009, vol. 48, No. 4, pp. 833—848.
13. Pruppacher H. and Klett J. Microphysics of Clouds and Precipitation. — Kluwer Academic Publishers, 1997, 954 p.
14. <http://www.vaisala.ru/ru/products/thunderstormandlightningdetectionsystems/Pages/default.aspx>

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСКОРПУСНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Пивкин А.Н.<sup>1</sup>, Бейтуганов М.Н.<sup>2</sup>, Чочаев Х.Х.<sup>2</sup>, Машуков Х. Х.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов», г. Пермь

<sup>2</sup>ФГБУ «Северо – Кавказская ВС», г. Нальчик

<sup>3</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Цель исследования – разработка, создание и экспериментальная проверка нового эффективного средства воздействия на грозоградовые облака с целью предотвращения негативного воздействия градобитий, шквалов, ливней и наземных разрядов молний. В работе рассмотрена усовершенствованная конструкция ракетного двигателя – бескорпусной ракетный двигатель, обоснованы преимущества его использования для активного воздействия на атмосферные процессы, в частности, инициирование искусственных молний, представлены результаты натурных летных испытаний, проведенных в 2016 году на научно – исследовательском полигоне ВГИ.

На рис.1 представлена базовая конструкция бескорпусного ракетного двигателя [1].

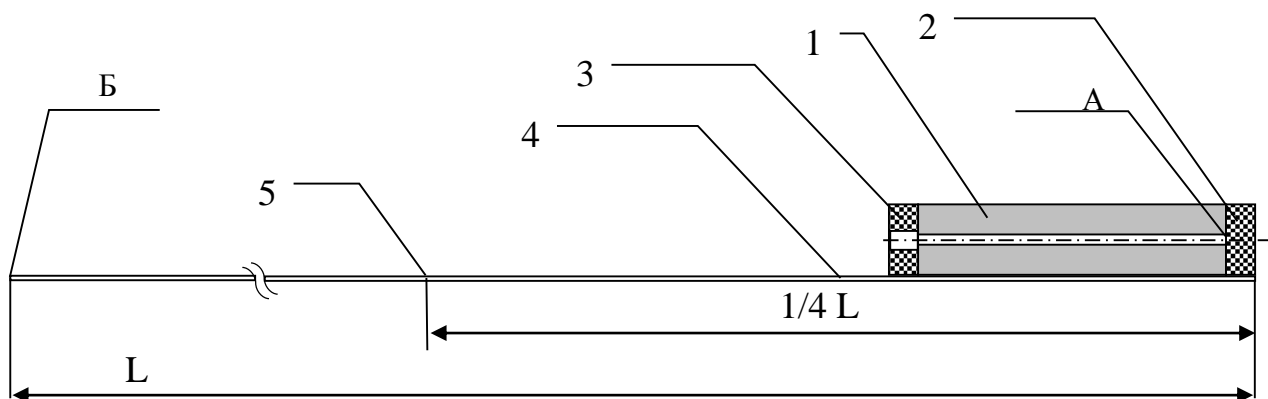


Рис. 1. Базовая конструкция БКРД: 1 – пороховая шашка, 2 – несгорающая передняя крышка, 3 – сопло с центральным и периферийными отверстиями, 4 – стабилизатор полета, 5 - центр тяжести конструкции. А – место расположения датчика давления (рис. 2).

На открытый торец пороховой шашки (1) с несгораемой передней крышкой (2) приклеивают шайбу (3) из медленно сгорающего материала с закрытыми на начальном этапе полета и открывающимися по мере выгорания пороха центральным и периферийными отверстиями. При этом пороховой цилиндрический элемент выполняет функцию ракетного двигателя, летящего со стабилизатором полета (4) в заданном направлении.



При обработке такого двигателя добиваются увеличенной тяги в начале полета устройства и маршевой тяги на разгонном этапе (рис. 2).

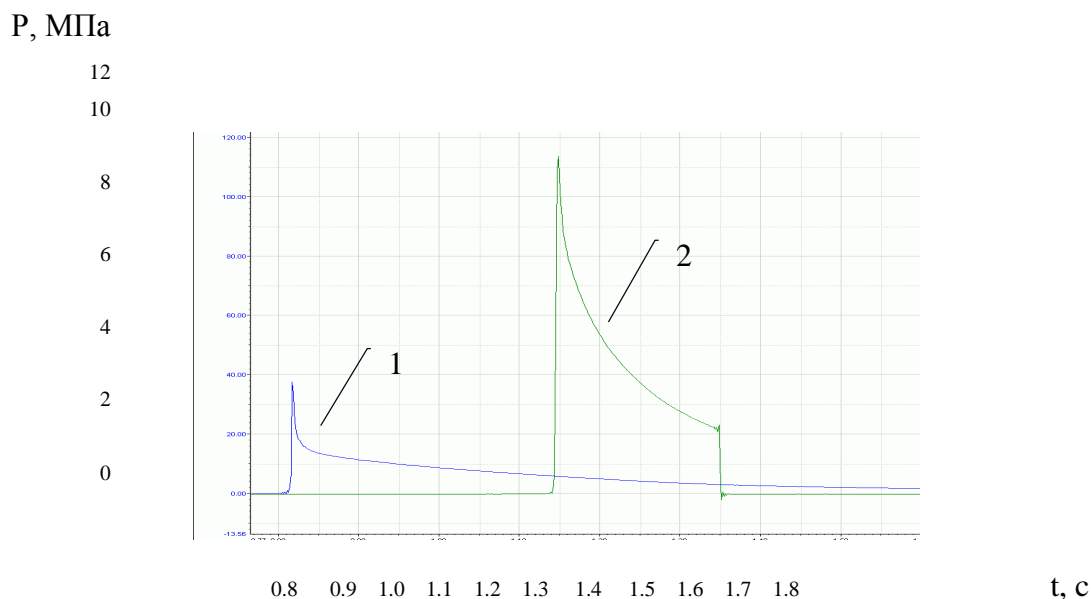


Рис. 2. Экспериментальные кривые давление-время, измеряемые в головной части пороховой шашки БКРД (точка А на рис. 1): 1 – горение топливной шашки без сопла; 2 – горение топливной шашки с соплом. Время задержки воспламенения одинаковое, кривые смещены для наглядности.

Использование сопла позволяет в несколько раз увеличить давление внутри пороховой шашки и сократить время воздействия этого давления на её стенки. В результате пороховая шашка не успевает прогреться и потерять прочность при разгоне летающего устройства.

По предварительным оценкам, применение БКРД обеспечивает многократное увеличение дальности полета по сравнению с «традиционным» РДТТ, использующим аналогичное количество топлива. Совершенствование конструкции и условий инициирования горения позволяет получать необходимые тяговые характеристики ракеты, используя как отработанные рецептуры составов, так и экологически чистые пороха, в продуктах сгорания, которых отсутствуют высокотоксичные вещества. Дополнительными преимуществами представленной конструкции является значительное снижение стоимости изготовления и эксплуатации при повышении надёжности и безопасности использования. Отметим и существенное упрощение конструкции пусковых устройств при повышении безопасности их эксплуатации.

Согласно существующим представлениям, зрелое грозовое облако представляет собой, вертикально расположенный электрический диполь, наверху которого, на высоте около 8 - 9 км находится центр положительного заряда и нижнего отрицательного заряда с центром на высоте 1-2 км выше изотермы  $0^{\circ}\text{C}$ . Иногда под нижним отрицательным зарядом возникает небольшой

положительный заряд [1]. Возникновение внутриоблачных и наземных молний связано с коронным разрядом с группы близко расположенных капель или тающих градин, свободно падающих в грозовом облаке [2-4]. Для зарождения лидерного типа разряда, необходима напряжённость поля в несколько кВ/см, а для дальнейшего его продвижения, т.е. для образования молнии достаточны поля, с напряжённостями около кВ/см [5].

Из зрелых грозовых облаков в исследовательских целях инициировали наземные молнии с помощью ракет, поднимающих к основанию облака заземлённый одним концом проводник, а для инициирования внутриоблачных молний - ракеты с длинным проводником [9]. Влияние молниевых разрядов на процессы осадкообразования исследовалось в работе [10]. Анализируя скорость нарастания и спада интенсивности радиоэха грозового облака после разряда молнии, автор приходит к выводу о том, что разряд молнии приводит к интенсивному выпадению дождя или града. Несмотря на то, что этот вывод не бесспорен, главным на наш взгляд является то, что молния порождает эффекты, способствующие возникновению частиц града. Этот вопрос можно рассмотреть шире, если учесть тот отмечаемый в литературе факт о переходе грозового состояния облака в градовое в отношении 10 к 1 [11].

Исследуя возможность инициирования искусственных молний в грозоградовых облаках плазменными образованиями, получающимися при подрыве в них 100 мм артиллерийских снарядов, было обнаружено колоссальное влияние искусственных молний на радиоэхо облаков. Площадь контуров радиоэха вслед за искусственно инициированной молнией на перифериях полностью исчезала, а в его центральной части менялась на порядок и более [12,13]. Основываясь на этих экспериментах и учитывая более 10 физических явлений, обуславливаемых молниевыми разрядами, был предложен метод активного воздействия на грозовые и градовые облака инициированием в них искусственных молний [12]. Перспективность предложенного метода отмечен в работе [14], где предложено создание противоголового и противомолниевое комплекса на базе 100 мм зенитной пушки КС – 19 и артиллерийского снаряда, снаряжённого взрывчатым веществом с легкоионизирующимися добавками. В настоящее время, в связи с прекращением производства 100 мм безосколочных артиллерийских снарядов, для инициирования молний используется модернизированная противоголового ракета «Алазань» с токопроводящей поверхностью [15]. В связи с дороговизной этой ракеты и слабым усилением электростатического поля у кромки ракеты после отделения от неё маршевого двигателя и т.д., в настоящей работе предлагается использовать БКРД, который позволит доставить в грозоградовое облако длинный провод, который может явиться провокатором триггерных молний.

В работе [16] рассмотрены основные условия «пробоя» длинных воздушных промежутков. Установлено, что величина максимального электрического поля  $E_m$ , возникающего у концов

электропроводящего стержня длиной  $l$  (при  $10 < l < 2000$ ) и радиусом  $r$ , ориентированного вдоль однородного внешнего поля  $E_0$ , описывается интерполяционной формулой:

$$\frac{E_m}{E_0} = 3 + 0.56\left(\frac{l}{r}\right)^{0.92} \quad (1)$$

Таким образом, возрастание соотношения длины стержня к его радиусу повышает вероятность возникновения пробоя.

Применительно к конструкции ракетных двигателей это означает, что наиболее перспективными для указанных целей могут быть бескорпусные ракетные двигатели, в которых пороховая шашка играет роль внешнего корпуса РД.

При использовании противораковой ракеты «Алазань» для инициирования искусственных молний, поверхность ракеты покрывают токопроводящей краской. При использовании БКРД поверхность стабилизатора полёта с той же целью покрывают токопроводящей краской (рис. 1) и дополнительно прикрепляют токопроводящую проволоку (например, медную) или металлизированную кевларовую нить [17].

Зависимость величины максимального электрического поля, возникающего у концов электропроводящего стержня, летящего в электрическом поле грозового облака, по уравнению (1) графически представлена на рис. 3 с указанием параметров, достигаемых ракетой «Алазань», БКРД со стабилизатором, покрытым токопроводящей краской и БКРД с токопроводящей кевларовой нитью.

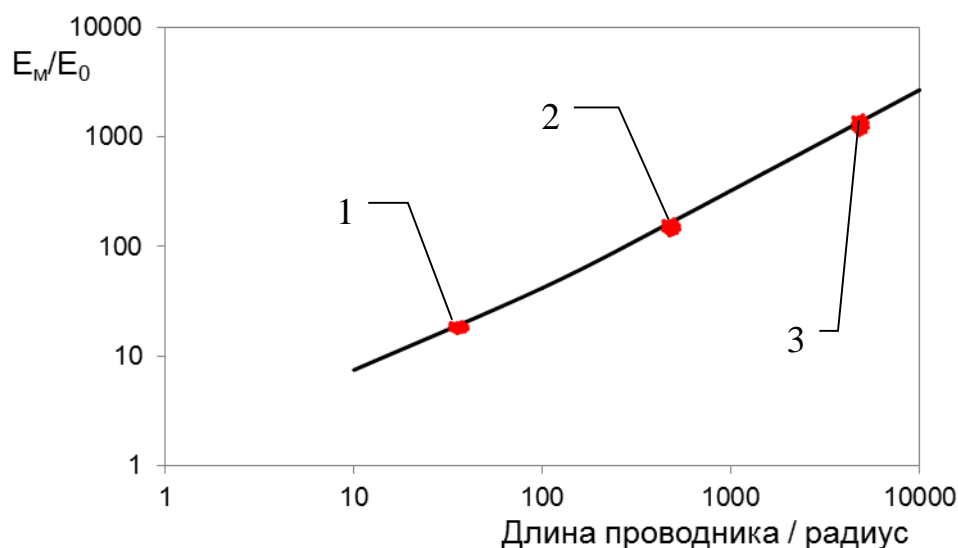


Рис. 3. Зависимость величины максимального электрического поля  $E_m$ , возникающего у концов электропроводящего стержня длиной  $l$  и радиусом  $r$ , ориентированного вдоль однородного внешнего поля  $E_0$  от соотношения  $l/r$  [16]:

- 1 – ракета Алазань, 2 – БКРД со стабилизатором, покрытым токопроводящей краской, 3 – БКРД с токопроводящей кевларовой нитью.

Очевидно, что усиление внешнего электрического поля, а, следовательно, и вероятность инициирования искусственных молний для БКРД существенно выше, чем для используемой в настоящее время ракеты Алазань-6, а использование металлизированной кевларовой нити длиной в десятки метров позволяет добиться еще более значимого усиления напряжённости внешнего поля.

Натурные испытания по инициированию искусственных молниевых разрядов производились с применением БКРД базовой конструкции, оснащенной электропроводящей нитью из металлизированного кевлара на научно-исследовательском полигоне ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик (высота над уровнем моря 747 м, 43, 6787°С.Ш., 43,4048°В.Д.). В зависимости от количества используемых двигателей при одном запуске БКРД (от 1 до 4 шт.), высота подъема ракеты изменялась от 300 до 1500 м.

Для запуска БКРД разработана и изготовлена 3-х канальная пусковая установка. В трех направляющих трубках размещаются стабилизаторы полёта устройств таким образом, что БКРД остаются снаружи. Стабилизатор изготавливается из деревянной рейки размерами 10×10×1560 мм, покрытой электропроводящей краской, к которой присоединяется металлизированная кевларовая нить с электросопротивлением по поверхности  $\approx 6$  кОм/м. Вес используемого БКРД составляет 60 г, время полного сгорания пороховой шашки 0,5 с, после чего токопроводящий стабилизатор с токопроводящей кевларовой нитью летит, замедляясь, к основанию грозового облака.

Дистанционное управление запуском БКРД осуществлялось с помощью электронного блока, настроенного на частоту 433 МГц, блок-схема которого представлена на рис. 4.

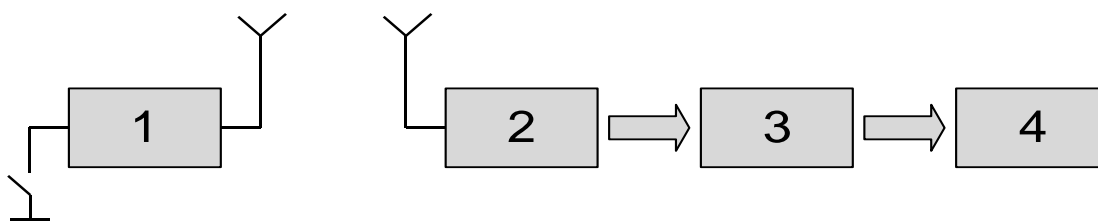


Рис. 4. Блок-схема устройства дистанционного запуска ракеты с БКРД: 1 – передатчик, 2 – приемное устройство, 3 – блок обработки радиосигнала, 4 – блок запуска БКРД.

Момент старта фиксировался по звуку работы двигателя с применением чувствительного микрофона. Экспериментально получено, что с двумя двигателями БКРД ракеты поднимаются до 600 метров, при этом кевларовая нить длиной до 300 м нормально сматывается с катушки и тянется за ракетой в виде шлейфа.

Для успешного инициирования искусственных молниевых разрядов определялись электрические параметры облаков, относящихся к грозовым, из которых возможно инициировать молниевые разряды при активных воздействиях. При этом устанавливалось начало и окончание

молниевой активности грозового облака, из которого планируется произвести искусственный разряд молнии, а также интенсивность молниевых разрядов в нем (число разрядов в единицу времени).

Во время грозы 11.08.2016 г. (грозовой процесс средней интенсивности – 7-8 разрядов молний в минуту) произведен пуск летающего устройства БКРД, а через 4,163 с аппаратура зарегистрировала инициированный искровой электрический разряд. Сила тока инициированного разряда составила 1-2 А, согласно расчету по зависимости [18]:

$$J_M = 10^{-2} R E_r [27.0 - 26.5 \exp(-0.07R)] \quad (6),$$

где  $J_M$  – амплитудное значения тока в кА,  $R$  – расстояние до канала разряда в км, а  $E_r$  – радиационная составляющая напряженности поля излучения в В/м.

Запуск ракеты также инициировал разряд молнии на восходящей траектории ее полета через 6,012 с после старта. Сила тока молнии в данном случае не определялась.

Таким образом, проведенные натурные испытания подтвердили перспективность и эффективность использования летающих устройств БКРД для инициирования искусственных молний.

В настоящее время для увеличения высоты полёта летающих устройств с БКРД базовой конструкции до высоты 10 км и более разработан усиленный вариант разгона летающего устройства [19]. При этом возможно как инициирование искусственных молний на соответствующих высотах, так и засеивание грозовых облаков льдообразующим компонентом (например, йодистым серебром) для борьбы с градообразованием.

На рис. 5 показана усовершенствованная конструкция БКРД, полученная при размещении на стабилизаторе полёта дополнительных пороховых шашек (до четырех), работающих синхронно. При этом значительно возрастает дальность и высота полёта ЛУ. Кроме того, введена вторая ступень, при воспламенении которой происходит засеивание облаков льдообразующими частицами.

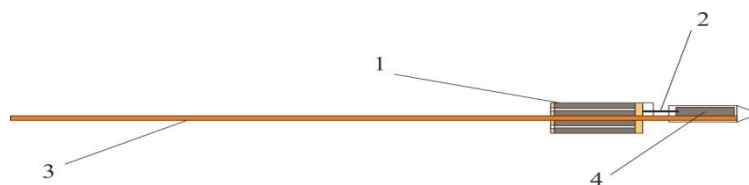


Рис. 5. Двухступенчатое летающее устройство с БКРД для засева грозоградового облака ЧКР [19]: 1 – связка из 3 или 4 БКРД (стартовая ступень), 2 – замедлитель, 3 – стабилизатор, 4 – вторая ступень для засева облака.

Прямые эксперименты показали, что при скорости горения пороха в БКРД не менее 30 мм/с достигается пятикратное увеличение скорости летящего после сгорания шашки стабилизатора полета с полезной нагрузкой (токопроводящая нить или вторая ступень с функциональным наполнителем).

Три БКРД (шашки) первой ступени полностью сгорают за 0,5с после старта, после их исчезновения лобовое сопротивление полёту резко снижается, а кинетическая энергия возрастает, согласно закону сохранения импульса. После этого полёт ЛУ продолжается за счёт набранной энергии и реактивной тяги второй ступени, при этом шашка АД горит в режиме, наиболее благоприятном для максимальной генерации ЧКР оптимального размера для, например, льдообразования в грозоградовом облаке.

### **Заключение**

1. Впервые предложено и успешно испытано в натуральных условиях летающее устройство, приводимое в движение бескорпусным ракетным двигателем. Показано, что по сравнению с традиционными РДТТ достигается значительное уменьшение стоимости изготовления и эксплуатации при сохранении эксплуатационных характеристик летающих устройств с РДТТ.

2. Выполнена теоретическая оценка возможности применения БКРД для инициирования искусственных молний, определены размеры необходимых токопроводящих элементов.

3. Представлены необходимые конструкторские решения, позволяющие повысить эффективность использования БКРД.

4. Предложено использовать БКРД для засева атмосферы и облаков ЧКР для целей активного воздействия на облака.

### **Список литературы**

1. Юман М. Молния. - Мир, 1972.-326 с.
2. Мучник В.М. Физика грозы. Гидрометеиздат, 1974 г., 351 с.
3. Бейтуганов М.Н. Об обуславливаемых сильными электрическими полями физических явлениях в облаках. – Метеорология и гидрология, 1989, вып. 9, с.42-49.
4. Григорьев А.И., Синкевич О.А., Ширяева С.О. О природе электрических явлений, связанных со смерчами. //III Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству. Тезисы докладов. – Тарту, 1986, с. 138.
5. Александров Г.Н. О механизме перехода коронного разряда в искровой в длинных воздушных промежутках. – Ж.Т.Ф., 1965, т. 38, вып. 7, с. 1226 – 1230.
6. Сулаквелидзе Г.К. Механизм образования града и принцип воздействия на градовый процесс. //Труды ВГИ, вып. 14, с. 5 – 17.

7. Абшаев М.Т., Федченко Л.М., Хоргуани В.Г. Исследование градовых процессов в СССР. – Метеорология и гидрология, 1987, вып. 7. с. 36 – 43.
8. Аджиев А.Х., Бейтуганов М.Н., Кумыков Х.К. и др. Развитие разрядных явлений в облаках. //Вопросы атмосферного электричества. В сб. статей, 1990, с. 111 – 119.
9. Laroche P., Delnnioy A., Metzger B. Neutralized electrical charges location during triggered lightning flashes. //Proc. Intern. Aerospace Conf. Light. Stat. Electricity, Oxford.-1982.-Vol.1. – P. 14-0-A14-15.
10. Мур Ч. Генерация зарядов в грозах. «Проблемы атмосферного электричества». Л. 1969 г. с. 185 – 193.
11. Женов Р. Град. – Л.: Гидрометеиздат, 1966.- с. 106.
12. Бейтуганов М.Н. Метод предотвращения града иницированием искусственных молний. //V-я Российская конференция по атмосферному электричеству.// г. Владимир. 2003. с. 204 – 207.
13. Бейтуганов М.Н. Иницирование искусственных молний как метод предотвращения града. // Известия Кабардино – Балкарского научного центра РАН. 2013. №1 (51), с. 38 – 43.
14. Кузнецов Н.С. Предложения по созданию артиллерийского заряда – формирователя искусственных молний, Боеприпасы, 2016, № 2, с. 60-64.
15. Бейтуганов М.Н., Машуков Х.Х. Модернизация противорадовых ракет для иницирования искусственных молний. VI-я Российская конференция по атмосферному электричеству.// г. Нижний Новгород, 2007. с. 204 – 207.
16. Базелян Э.М, Райзер Ю.П. Искровой разряд. М., Издательство МФТИ, 1997 г., с. 93.
17. Аджиев А.Х., Щукин Г.Г., Машуков Х.Х. Теоретическая оценка изменения напряженности электрического поля на концах сверхдлинных электропроводящих нитей. Известия КБНЦ РАН, №6 (50), 2012, с.50 - 53.
18. Разработка методики и аппаратуры для дистанционного измерения амплитуд токов молнии. Отчет о НИР, ГР №187,0004582, ин. №081290. НИИ высоких напряжений, научный руководитель В.А. Раков, Томск. - 1988.- с.34.
19. Пивкин Н.М., Пивкин А.Н., Ибрагимов Н.Г., Голубев А. Е. Способ ускорения летающего устройства, Патент RU 2603221 C1 от 03.11.2015] (RU).

## МЕТОДИКА УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ СОПОСТАВЛЕНИИ НАЗЕМНЫХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Жарашуев М.В., Гергоков А.Х., Макитов В.С., Кулиев Д.Д.  
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

### Введение

С развитием техники и технологий потребность в качестве радиолокационной продукции возрастает с каждым годом. На сегодняшний день радиолокационная сеть России насчитывает более 150 моделей метеолокаторов, как ДМРЛ, так и МРЛ-5.

Для измерения радиолокационной отражаемости облаков и осадков необходимо знать постоянную радиолокационной станции (метеорологический потенциал)  $C_{\lambda}$ . Наиболее точно реальное значение можно найти по стандартной радиолокационной мишени [1].

В качестве стандартной мишени обычно используют полый алюминиевый шар радиусом  $r = 15,25$  см, имеющийся в комплекте ЗИП МРЛ-5. Может использоваться также матерчатый надувной шар радиусом не менее 15,25 см, обклеенный алюминиевой фольгой. Расчет константы МРЛ по данным измерений радиоэха стандартной мишени осуществляется по формуле ( $\text{см}^3$ ):

$$C_{\lambda} = \frac{10^{0,1N} R^4 c \tau \theta^2}{3,54\sigma} \quad \text{или}$$

$$10 \lg C_{\lambda} = N + 40 \lg R + 10 \lg t + 20 \lg q - 10 \lg s + 99,3,$$

где  $N$  - мощность радиоэха мишени, усредненная по множеству измерений,  $\text{dB}$ ;

$R$  - наклонная дальность мишени,  $\text{см}$ ;

$\tau$  - длительность импульса,  $\text{мкс}$ ;

$\sigma = \pi r^2$  - поперечное сечение обратного рассеяния сферической мишени радиуса  $r$ ,  $\text{см}^2$ .

В случае калибровки по мишени, отпущенной в свободный полет, осуществляются непрерывные измерения  $R$  и  $N$  в режиме сопровождения мишени до исчезновения ее радиоэха на уровне шумов. Строится кривая зависимости мощности радиоэха  $N$  от расстояния  $R$ , которая уменьшается пропорционально  $R^4$ , и значение  $C_{\lambda}$  рассчитывается по формуле:

$$10 \lg C_{\lambda} = N + 40 \lg R - \text{const}, \text{ dB},$$

где значение  $N$  может быть взято на расстоянии, например,  $R = 106$  см и  $\text{const} = 17,92$  (при  $r = 15,25$  см,  $q = 1,5^\circ$  и длительности импульса  $t = 2$  мкс).

Этот метод калибровки охватывает все параметры приемопередающего тракта и антенной системы МРЛ и является наиболее точным. Однако, несмотря на его преимущества, он не всегда применяется из-за проблем организации такой калибровки.



Предлагаемая методика и алгоритмы калибровки локаторов позволят по одному откалиброванному локатору провести автокалибровку всех остальных локаторов сети. В конечном итоге это позволит повысить эффективность противорадовой защиты, надежность штормового оповещения и метеобеспечения авиации, эффективность радиолокационных исследования облаков и т.д.

### **Методика и алгоритм калибровки локаторов сети**

Конвективная ячейка в облачной системе, согласно [6], выделяется как поле радиоэха, ограниченное замкнутыми изолиниями радиолокационной отражаемости ( $Z, dBZ$ ) и имеющее одну конвективную вершину (например, как гора, ограниченная замкнутыми изолиниями высот и имеющая свою вершину). Но, в отличие от горы, у облачной КЯ изменяются во времени число изолиний  $Z$ , высота, поперечные размеры, площади горизонтальных сечений, объем, пространственная конфигурация, водосодержание и вид образующихся осадков.

Задача калибровки по облакам и эталонному локатору является сложным многоэтапным процессом. Учитывая сложность этой задачи, решение этой задачи предлагается осуществлять по следующему алгоритму:

- определение области равноудаленной от двух локаторов - средней зоны (СЗ);
- выделение в поле радиоэха облачности точек, ограничивающих замкнутые изолинии радиолокационной отражаемости  $Z$ ;
- упорядочивание полученных точек - получение составных частей КЯ;
- объединение составных частей КЯ в единые поля замкнутых изолиний  $Z$ ;
- выделение в поле радиоэха вершин, ограниченных замкнутыми изолиниями  $Z$ ;
- идентификация КЯ и их нумерация в пространстве и в хронологическом порядке зарождения;
- определение конвективных ячеек, центр которых входит в СЗ;
- измерение комплекса одно-, двух- и трехмерных параметров каждой КЯ;
- сравнение и корректировка поверяемого локатора с эталонным;
- расчет направления и скорости перемещения КЯ;
- оценка степени грозо- и градоопасности КЯ, распознавание категорий ОВ;
- документирование таблицы параметров КЯ и графиков их временного хода.

Решение поставленной задачи осуществляется путем обработки трехмерных полей радиолокационных сигналов, получаемых с помощью АМРК «АСУ-МРЛ», программное обеспечение которого, позволяет получить с цикличностью 3,5 мин объемный файл обзора, содержащий осредненные и оцифрованные радиолокационные сигналы в 360 секторах азимута (с

шагом 1 градус), 400 каналах дальности (с шагом 0,5 км) и 18 (или 24) углах обзора (с переменным шагом), а также полярные координаты этих сигналов (азимут, угол возвышения, радиальная дальность).

По подобным данным во всех существующих АМРК формируются различные карты (карты горизонтальных сечений на различных уровнях высот, верхней границы радиоэха, максимальной отражаемости, интенсивности осадков, явлений погоды и т.д.) отображаемые на фоне карты местности.

Для реализации предлагаемой методики и алгоритмов идентификации КЯ осуществляется:

- преобразование полярных координат полученных сигналов в декартовы координаты;
- пересчет мощности радиоэха в отражаемость  $Z$  (по калибровочным данным);
- формирование матрицы данных об отражаемости  $Z$  во всех точках виртуального пространства  $X, Y, Z$  размером  $400 \times 400 \times 20$  км, содержащей псевдогоризонтальные сечения на 40 уровнях высот;
- построение карты максимальной отражаемости;
- последовательного сканирования точек виртуального пространства по  $X, Y$  и  $Z$  с шагом 0,5 км, с целью выделения границ КЯ (западной, восточной, северной и южной), определяемых по заданным порогам изолиний  $Z$ .

Получаемая при этом последовательность координат  $X, Y$  представляет собой пары точек начала и конца изолинии  $Z$  в каждой строке матрицы данных. Хотя в одной строке пары точек одной КЯ могут быть перемешаны с парами точек другой КЯ, составные части каждой КЯ восстанавливаются следующим образом:

а) полученные при переборе первые две точки, соответствующие южному краю первой подъячейки КЯ № 1, имеющие координаты  $X_{31}, Y_{31}, X_{B1}, Y_{B1}$ , где индексы «3» и «B» означают западную и восточную границы КЯ, соответственно. При этом значение  $Y_{31}$  всегда равно  $Y_{B1}$ ;

б) следующие две точки проверяются на принадлежность к контуру КЯ № 1. Если  $X_{31} < X_{32} < X_{B1}$  и  $Y_{31} - 1 = Y_{32}$  или же  $X_{31} < X_{B2} < X_{B1}$  и  $Y_{31} - 1 = Y_{32}$ , то получаем следующие две точки первого контура КЯ. Если это условие не выполняется, то имеем дело, либо с концом подъячейки, либо с новой подъячейкой. Таким образом, можно получить набор пар точек, составляющих подъячейку в последовательности с юга на север и с запада на восток.

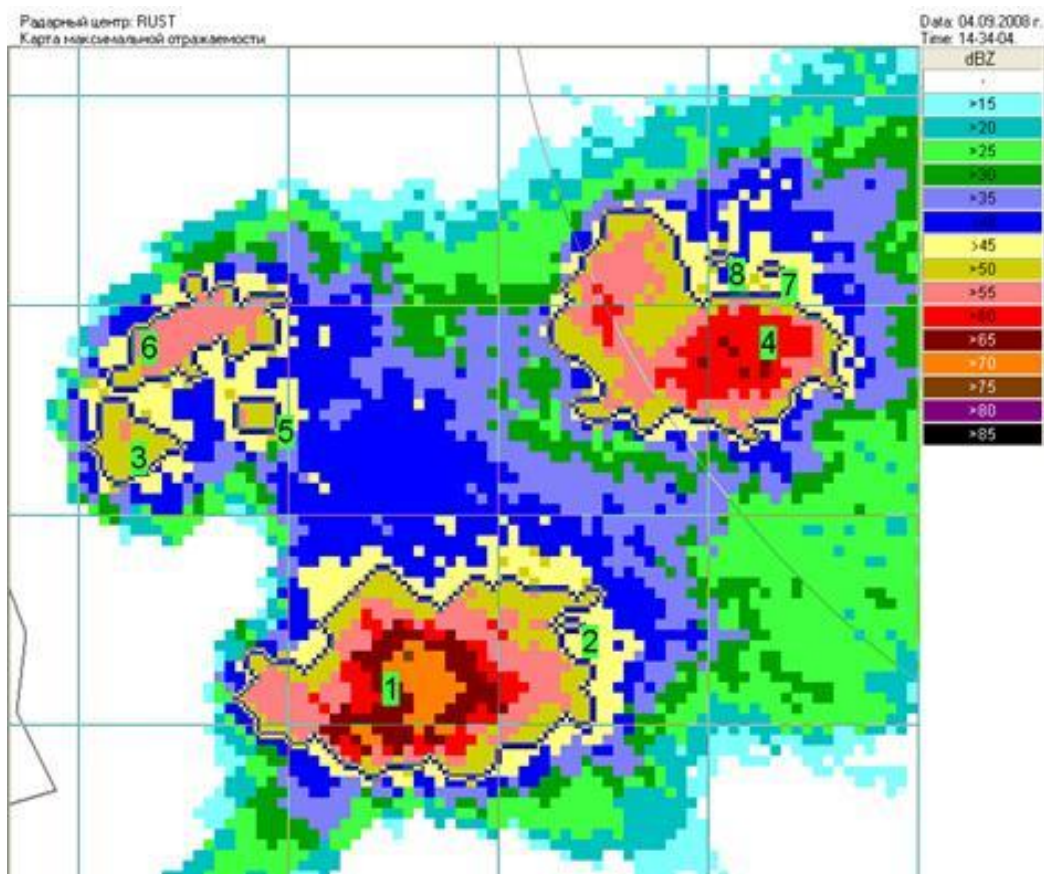


Рис. 1. Пример карты выделения и нумерации конвективных ячеек.

На следующем этапе необходимо упорядочить точки, ограничивающие подъячейку, так как на первом этапе получена не последовательность точек, а набор пар точек. Зная количество пар точек, входящих в подъячейку, можно их разделить на западные и восточные границы подъячеек и расставить их по порядку. В результате этого выделяется контур подъячейки.

Для объединения подъячеек в единую ячейку необходимо сравнить северные и южные пары точек всех подъячеек со всеми параллельными точками текущей подъячейки на предмет принадлежности пар подъячеек одной КЯ и объединить каждый контур сплошными линиями, имеющими цвет, в соответствии с принятой палитрой цветов отображения полей отражаемости  $Z$ .

После выделения КЯ им присваиваются номера, начиная с № 1 в каждые сутки. При обнаружении многоячейковой облачной системы в первом цикле радиолокационного обзора, нумерация КЯ осуществляется с запада на восток, с севера на юг (т.е. № 1 присваивается самой северо-западной КЯ, а последний номер присваивается КЯ, расположенной юго-восточнее всех). В следующих циклах обзора номера присваиваются в хронологическом порядке обнаружения КЯ (см. рис. 1). Номера присваиваются КЯ, площадь горизонтального сечения которых превышает пороговую (например, более  $10 \text{ км}^2$ ).

После выделения и нумерации КЯ, ищем КЯ равноудаленные от двух локаторов эталонного и поверяемого (см. рис. 2). Для этого используя формулу расстояния между двумя точками (1) выражаем условие равноудаленности прямой от локаторов (2). Далее выразив  $x_0$  (3), находим искомое уравнение прямой, равноудаленной от двух локаторов.

$$AB = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \quad (1)$$

$$(x_0 - x_1)^2 - (x_0 - x_2)^2 = (y_0 - y_2)^2 - (y_0 - y_1)^2 \quad (2)$$

$$x_0 = \frac{2y_0(y_1 - y_2) + y_2^2 - y_1^2 - x_1^2 + x_2^2}{2(x_2 - x_1)} \quad (3),$$

где  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  - координаты локаторов эталонного и калибруемого соответственно.

Далее проверяют попадание максимального значения отражаемости конвективной ячейки в область, равноудаленную от двух локаторов плюс минус 5 километров - среднюю зону.

В основе данного метода лежит идея подсчёта количества пересечений горизонтального луча, исходящего из точки максимального радиоэха конвективной ячейки со сторонами многоугольника. Точка не принадлежит многоугольнику, если количество пересечений - четно.

1. Для этого перебирают все соседние пары вершин  $A[n]$  и  $A[n+1]$  многоугольника. Если максимальное значение отражаемости рассматриваемой КЯ по  $y$  координате лежит между текущими вершинами, то мы можем пустить параллельный оси  $X$  луч в одну из сторон.

2. Далее проверяем пересечение луча с отрезком. Для этого:

- составим уравнение прямой, проходящей через 2 точки  $A[n]$  и  $A[n+1]$ :

$$\frac{X - A[n].X}{A[n+1].X - A[n].X} = \frac{Y - A[n].Y}{A[n+1].Y - A[n].Y} \quad (4)$$

- выразим  $X$  из уравнения

$$X = \frac{(Y - A[n].Y) * (A[n+1].X - A[n].X)}{A[n+1].Y - A[n].Y} + A[n].X \quad (5)$$

- подставим в место  $X, Y$  координаты нашей точки.

$$3. \text{ Если } X > \frac{Y - A[n].Y}{(A[n+1].Y - A[n].Y) * (A[n+1].X - A[n].X) + A[n].X} \quad (6),$$

то точка находится правее (левее, если обход многоугольника против часовой стрелки) по  $X$  от отрезка  $A[n] A[n+1]$  и у нас есть пересечение.

4. Если общее количество пересечений – четное число, то точка лежит снаружи многоугольника.

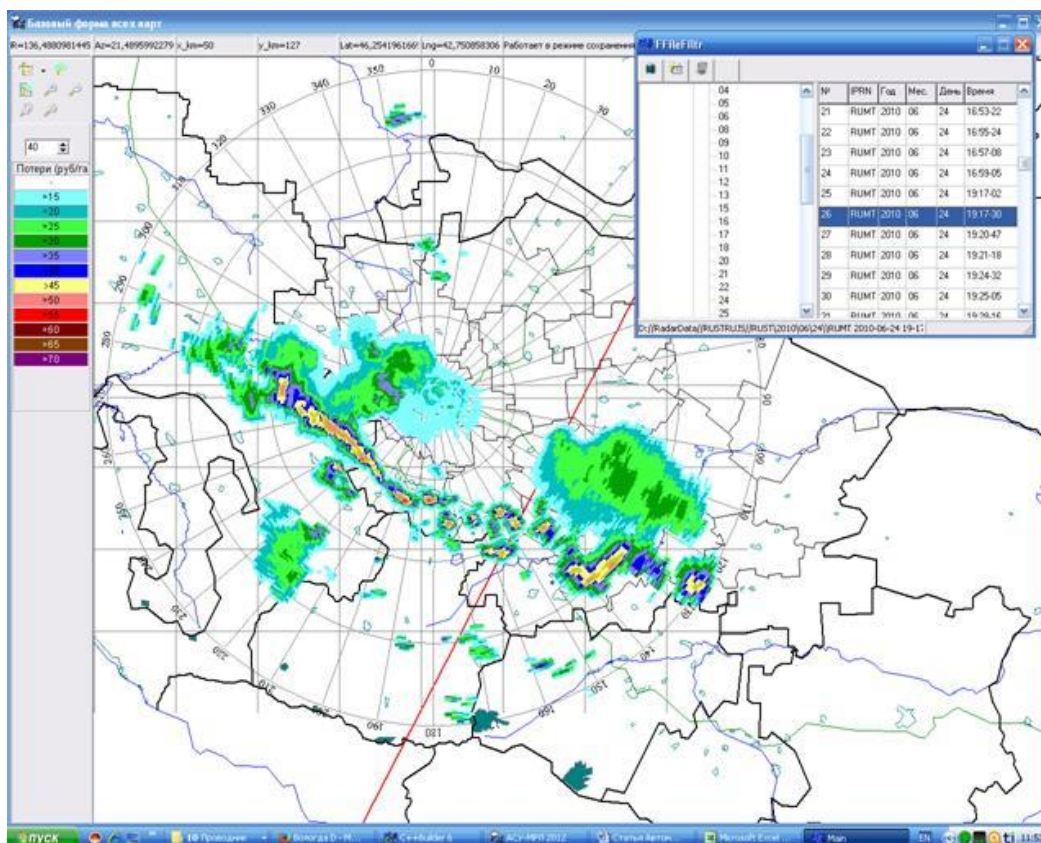


Рис 2. Карта с отображением линии, равноудаленной от двух локаторов.

### Методика сравнения данных двух локаторов

После решения задачи выделения и нахождения равноудаленных КЯ, решается задача автоматического измерения их параметров. В существующих автоматизированных радиолокационных системах [2-5] для измерения параметров ячейки нужно вручную локализовать КЯ (выделить ее в рамку), в пределах которой далее автоматически рассчитываются параметры КЯ, путем сканирования всех точек пространства от уровня стояния радиолокатора до высоты 20 км над уровнем моря.

Автоматическое выделение КЯ исключает необходимость ручной локализации КЯ и дает координаты проекции КЯ на горизонтальную плоскость, по которым сканируется требуемая область пространства и, в соответствии с [1,2], измеряется около 100 одномерных, двумерных и трехмерных параметров каждой КЯ, которые записываются в накапливаемую за весь период наблюдений таблицу параметров. Но для корректировки константы локатора, были использованы всего 2 характеристики – максимальная отражаемость и высота максимальной отражаемости. Из таблицы 1 видно, что на Зеленокумском локаторе (RUJS) данные занижены относительно эталонного Ставропольского локатора (RUST) на 3 dBz. После калибровки поверяемого локатора его принимают за эталонный, что позволяет проводить сравнения с другими локаторами сети.

## Сравнение характеристик Зеленокумского и Ставропольского локаторов

Дата	Локатор	Время	$Z_{max}$	$H_{zmax}$	$dZ$	$dH$
29.05.10	RUST	16:53:05	59	4	6	1,5
	RUJS	16:55:42	53	2,5		
17.06.10	RUST	13:14:55	62	4	2	2
	RUJS	13:14:25	60	6		
22.06.10	RUST	20:27:30	56	2,5	2	0,5
	RUJS	20:28:48	54	2		
24.06.10	RUST	19:17:30	54	6	4	1,5
	RUJS	19:17:02	50	4,5		
19.07.10	RUST	11:05:36	44	5	2	0,5
	RUJS	11:07:08	42	4,5		
20.08.10	RUST	22:17:03	49	4	3	0,5
	RUJS	22:18:22	46	3,5		
Среднее					3	1

Построение графиков временного хода параметров КЯ осуществляется автоматически путем сохранения вместе с нумерацией КЯ координат центра масс, площади КЯ и таблицы параметров всех ячеек в радиусе обзора (200 км). При разделении КЯ на две, номер материнской КЯ сохраняется за той, к которой ближе центр масс, а второй КЯ присваивается следующий в хронологическом порядке номер. Параметры идентифицированных ячеек отсчитываются в цикле обзора каждые 3,5 мин, вносятся в накапливаемую со временем наблюдений таблицу и наносятся на графики временного хода, позволяющие проследить эволюцию КЯ в течение всего времени их существования, включая стадии развития, квазистационарного состояния и диссипации.

Комплексный анализ полей радиоэха позволяет своевременно обнаружить зарождение новых КЯ. Если при анализе точек, входящих в КЯ, обнаружено увеличение площади поля радиоэха, то осуществляется проверка его на предмет существования в таблице параметров. Если в таблице существует КЯ с центром масс на расстоянии меньшем, чем поперечник радиоэха КЯ, то считается, что КЯ существовала, но переместилась. В случае зарождения нового пространственно изолированного радиоэха или замкнутых контуров в поле радиоэха существующих КЯ, их центр масс не соответствует по расстоянию центру масс ни одной ранее

зафиксированной КЯ, то считается что, произошло зарождение новой КЯ и ей присваивается очередной номер.

### **Заключение**

Предлагаемый метод и алгоритмы автоматизированной калибровки локаторов в сети реализован и оттестирован в программе. Было проанализировано множество случаев несовпадения показаний локаторов и рассчитаны необходимые изменения в коэффициентах константы локатора.

### **Список литературы**

1. Абшаев М.Т., Шевела Г.Ф., Васильев Г.Ф., Ваксенбург С.И. Специализированный радиолокатор градозащиты и штормооповещения МРЛ-5 и его метеорологическая эффективность // Труды ВГИ, Вып. 33, 1975. С. 3 – 30.
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 штормооповещения. Гидрометеиздат – Москва, Метеорология и гидрология, № 3. 2010 – С. 36 – 45.
3. Автоматизированная радиолокационная система управления и обработки информации радиолокатора МРЛ-5 «АСУ-МРЛ». Руководство по эксплуатации АСУ.001.010 РЭ. Нальчик, 2007. – С. 73.
4. РД 52.04.320-91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. – СПб: Гидрометеиздат, 1993. – С. 264.
5. РД 52.11.332.93. Методические указания. Методика выполнения радиолокационных наблюдений с помощью комплексов АКСОПРИ. Вторая редакция / Ю.В. Мельничук, В.Н. Губарчук, Н.И. Серебрянник – М.: 1997. – С. 68.
6. РД 52.37.596-98. Инструкция. Активное воздействие на градовые процессы / М.Т. Абшаев. – С.П.: Гидрометеиздат, 1998. – С. 32.

## МЕТОД АВТОКАЛИБРОВКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЕТИ

Жарашуев М.В., Макитов В.С., Кулиев Д.Д., Гергоков А.Х.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

### Введение

С развитием техники и технологии, возрастает потребность в качественном метеообеспечении различных отраслей экономики, расширяются возможности сравнения метеопараметров, полученных из различных источников. Для этих целей нами была разработана программа для автоматического сравнения радиолокационных и наземных данных. Для сравнения радиолокационных данных сети «ДМРЛ-С» с данными сети метеонаблюдений, нами была разработана программа «RadMet.exe», обеспечивающая автоматическое построение карты заданного региона (например, Северного Кавказа), на которую на фоне административных границ территории наносятся:

- позиции гидрометеорологических станций (ГМС);
- суммарный слой осадков по радиолокационным данным «ДМРЛ-С»;
- слой осадков по данным ГМС.

Программа «RadMet.exe» опрашивает 93 страницы официального сайта Гидрометцентра РФ <http://meteoinfo.ru>, с которого берет 12 и 24 часовые данные ГМС об осадках (в 07 и 19 часов по Гринвичу за 24 и 12 часов, соответственно). Эта информация сохраняется в базе данных. При поступлении радиолокационной информации происходит наложение радиолокационных данных на данные метеостанций соответствующего синоптического срока. Нами был проведен анализ выпавших осадков за 2013 год по данным «ДМРЛ-С» в г. Ставрополе и г. Волгограде. Проведенный сравнительный анализ данных, полученных от метеостанций и локаторов, показал, что различия в показаниях локатора и сети метеостанций отличаются и коэффициент корреляции в среднем равен 0,45.

### Анализ выходных данных

Пример карт сравнения слоя осадков, измеренных Волгоградским и Ставропольским «ДМРЛ-С» и сетью метеостанций Северного Кавказа, приведен на рисунке 3. На этом рисунке видно, что при общем согласии данных имеют место и расхождения слоя осадков, измеренных «ДМРЛ-С» ( $Q_R, mm$ ) и метеостанциями ( $Q_M, mm$ ).

Причинами таких расхождений, согласно [2] могут быть:

- а) неточность подсчетов количества осадков метеостанцией;
- б) неточность калибровки «ДМРЛ-С»;



- с) некорректный учет ослабления радиоволн в волноводном тракте, ветрозащитном укрытии, атмосферных газах, облаках и осадках;
- d) неточность используемого корреляционного соотношения  $Z - I$ ;
- e) удаление радиолуча от поверхности земли и перелет луча над зоной осадков на больших удалениях;
- f) уширение радиолуча с расстоянием;
- g) аномальная рефракция радиоволн;
- h) несовпадение времени и координат радиолокационных и наземных измерений сравниваемого слоя осадков;
- i) наличие углов закрытия обзора и др.

Логический анализ возможного влияния этих причин показывает, что первые три причины могут привести к систематическому расхождению значений  $Q_R$  и  $Q_M$  и тем большим ошибкам, чем больше ошибка в определении константы (метеорологического потенциал ДМРЛ) и ослабление радиоволн в ветрозащитном укрытии (в период дождя) и в осадках.

Основными компонентами систематической ошибки при измерении осадков и их метеорологические и инструментальные факторы, можно описать следующей формулой [7], причем причины перечислены в порядке значимости:

$$P_k = k_1 P_c = k (P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \pm \Delta P_4 + \Delta P_5), \quad (1)$$

где  $P_k$  – скорректированное количество осадков;

$P_c$  – величина осадков, собранных в коллекторе прибора;

$k_1$  – поправочный коэффициент, собранных в коллекторе прибора;

$P_g$  – измеренное количество осадков в осадкомере;

$k$  – потери по причине деформации ветрового поля приемным отверстием осадкомера;

$(\Delta P_1 + \Delta P_2)$  – потери жидкости за счет смачивания внутренних стенок коллектора и жидкости, оставшейся в контейнере после его опорожнения;

$\Delta P_3$  – потери за счет испарения из контейнера;

$\Delta P_4$  – разбрызгивание или забрызгивание;

$\Delta P_5$  – задувание снега.

Факторы, влияющие на потери по причине деформации ветрового поля над приемным отверстием осадкомера, можно разделить на 2 типа [7]:

- метеорологические – это скорость ветра над осадкомером, во время выпадения осадков, и структура осадков;

- инструментальные, к которым относятся форма, площадь приемного отверстия и толщина обода осадкомера и приемного коллектора составляют от 10 до 50% для снега и от 2 до 10% для жидких осадков.

Для уменьшения погрешности измерения осадков нами предлагается новый тип pluвиографа – *плювиограф кровельного типа*. Принцип работы pluвиографа кровельного типа представлен на рис 1, он состоит в том, что кровля может быть использована как площадка сбора осадков. Для этого необходимо рассчитать площадь проекции кровли на плоскость и добавить площадь сточных желобов. Сток с площади сбора должен быть организован в одном месте. Подсчитав количество осадков, и разделив на площадь сбора, можно рассчитать количество осадков в единице объема.

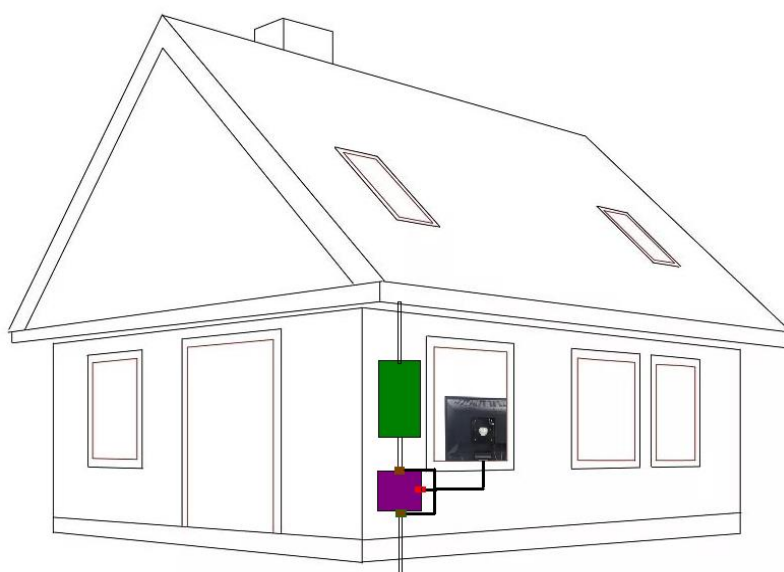


Рис. 1. Плювиограф кровельного типа (общая схема).

Автоматический подсчет собранных осадков предлагается осуществлять следующим образом: в сточную трубу последовательно включается буферный резервуар, электромагнитный водяной клапан, бак с датчиком уровня воды (можно использовать автомобильный бак с датчиком уровня топлива) и сливной электромагнитный клапан.

При неполном баке первый электромагнитный клапан открыт, второй закрыт, вода попадает в бак датчика уровня топлива, изменяя сопротивление, показывает степень заполнения бака. После того, как бак заполнится, на первый электромагнитный клапан поступает команда – закрыть, а на второй – открыть, при этом на компьютер передается, по проводным или беспроводным каналам данных, информация о заполнении бака водой. После слива топливный датчик, изменив сопротивление, закроет второй клапан, открыв первый, в бак вновь начнет поступать вода.

Для измерения интенсивности осадков на блок управления БУ, с заданным интервалом времени, происходит опрос датчика уровня воды. Таким образом, можно будет организовать сеть осадкомеров в любом месте, где есть помещения.

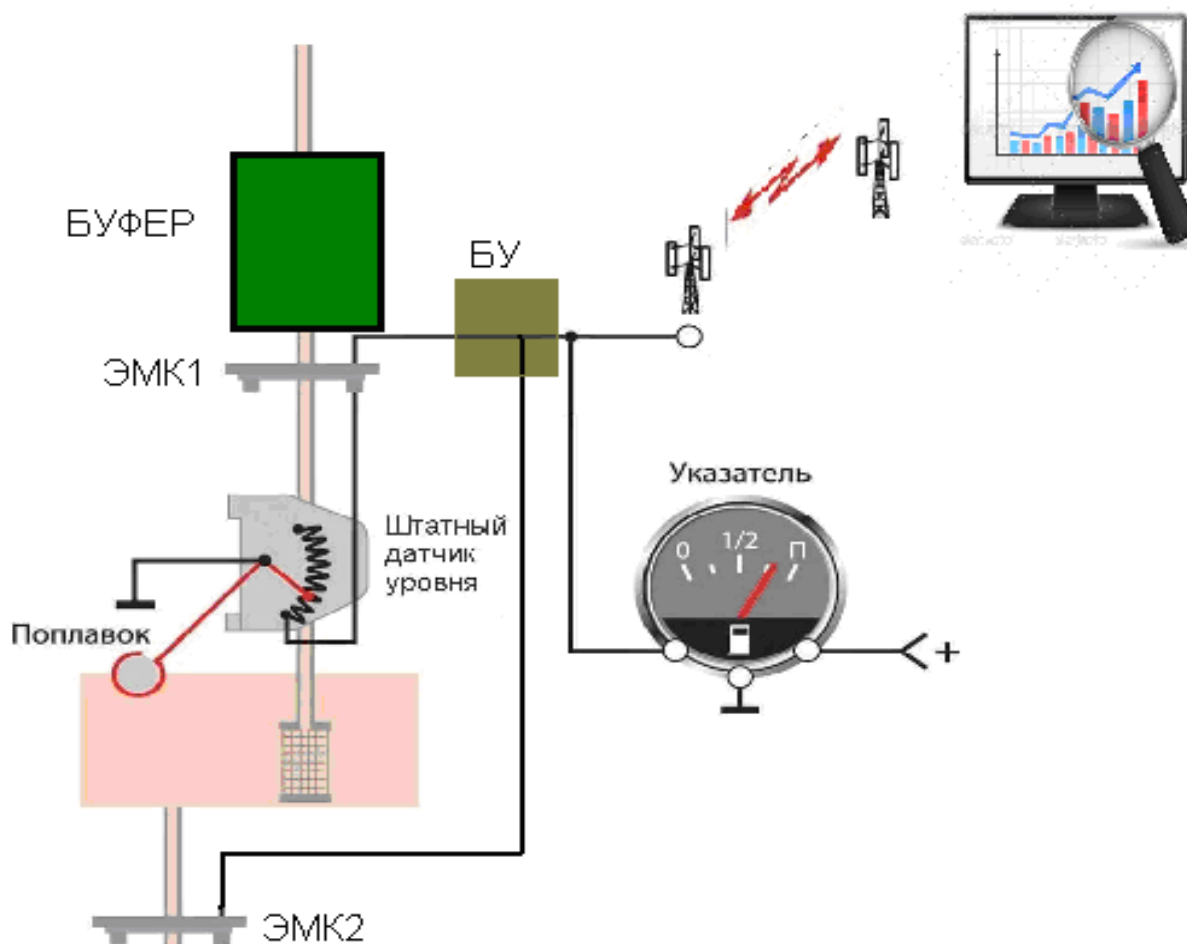


Рис. 2. Принципиальная схема плювиографа кровельного типа.

Основными плюсами данного типа плювиографа является большая площадь сбора, уменьшающая погрешность за счет объемов, и доступность данного типа плювиографа, которая приведет к удешевлению стоимости автоматизированной сети осадкомеров.

Четвертая причина также может привести к систематическим расхождениям, но при разумном выборе  $Z - I$  соотношения, они обычно меньше чем влияние других причин, рассмотренных ниже.

Причины d) – f) обычно приводят к снижению точности радиолокационного измерения осадков и нарастанию ошибок измерения с расстоянием, которые комментируются ниже.

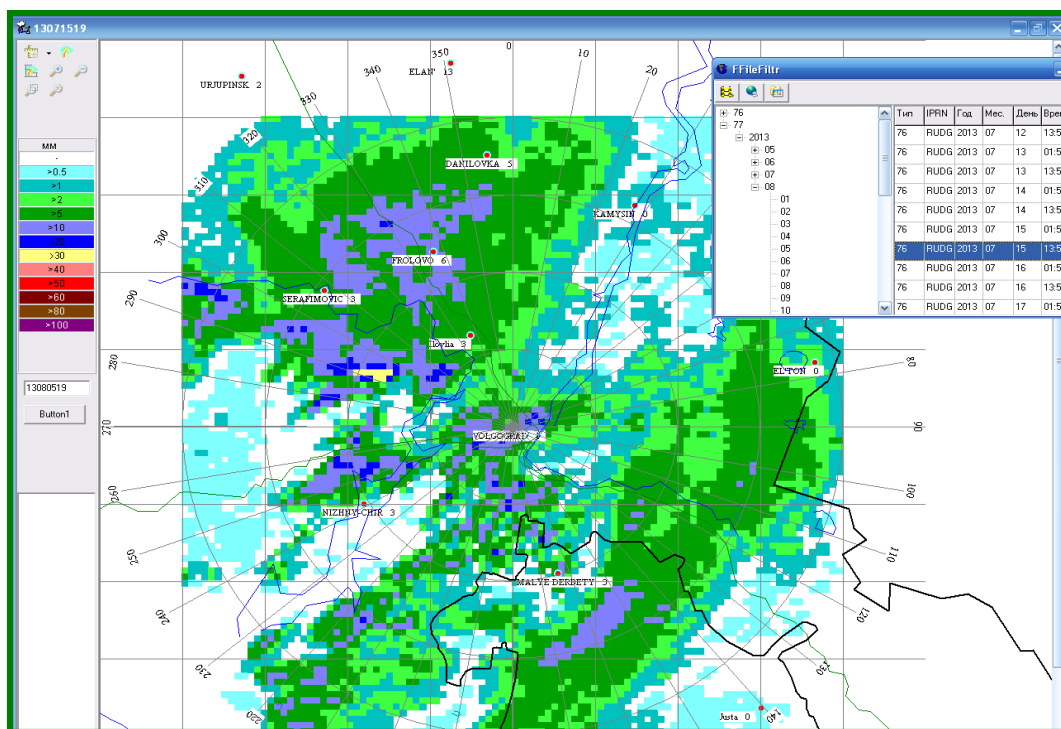


Рис. 3. Карта полусуточных осадков (с 00<sup>00</sup> до 12<sup>00</sup> UTC), выпавших в Волгоградской области 15 июля 2013 г.

Несовпадение времени и координат радиолокационных и наземных измерений сравниваемого слоя осадков могут возникать из-за путаницы в передаче данных, а также вследствие ветрового переноса (особенно в случае локальных и неоднородных по площади ливневых осадков);

Наличие углов закрытия обзора является причиной того, что в секторах закрытия радиолокатор не обнаруживает осадки. Это создает серьезные проблемы измерения осадков в горных районах, где почти неизбежно возникают углы закрытия приземного слоя, ограничивающие обзор. Например, Большой Ставропольский хребет высотой 300-600 м закрывает обзор Ставропольского МРЛ-5 в западном и юго-западном направлении на 0,5 – 1,5 градуса. Это приводит к серьезному занижению параметров облаков и осадков в этих направлениях, сокращению площади и интенсивности осадков, в том числе, и градовых. Когда высота гор превышает толщину приземного 1 км слоя измерения осадков, над ними и за ними образуются «дыры» в поле осадки. Это же наблюдается в секторах закрытия обзора деревьями, мачтами и другими сооружениями закрывающими обзор. Размещение МРЛ на подавляющих высотах может решить эту проблему, но не всегда реализуемо из-за отсутствия коммуникаций. Кроме того, при этом требуется обзор при углах ниже горизонта, чтобы обнаружить осадки в ближней зоне (в радиусе до 50 км).

Для получения статистических данных о корреляции радиолокационных и наземных данных о слое осадков, точности радиолокационного измерения осадков и ее зависимости от расстояния проведен сравнительный анализ выходных данных программы «RadMet» за апрель - август 2013 года.

### Корреляция радиолокационных и наземных данных

На рис. 4 и 5 представлены графики соотношения результатов радиолокационного и наземного измерения 12 и 24 часового слоя осадков в периоды с апреля по август 2013 г.

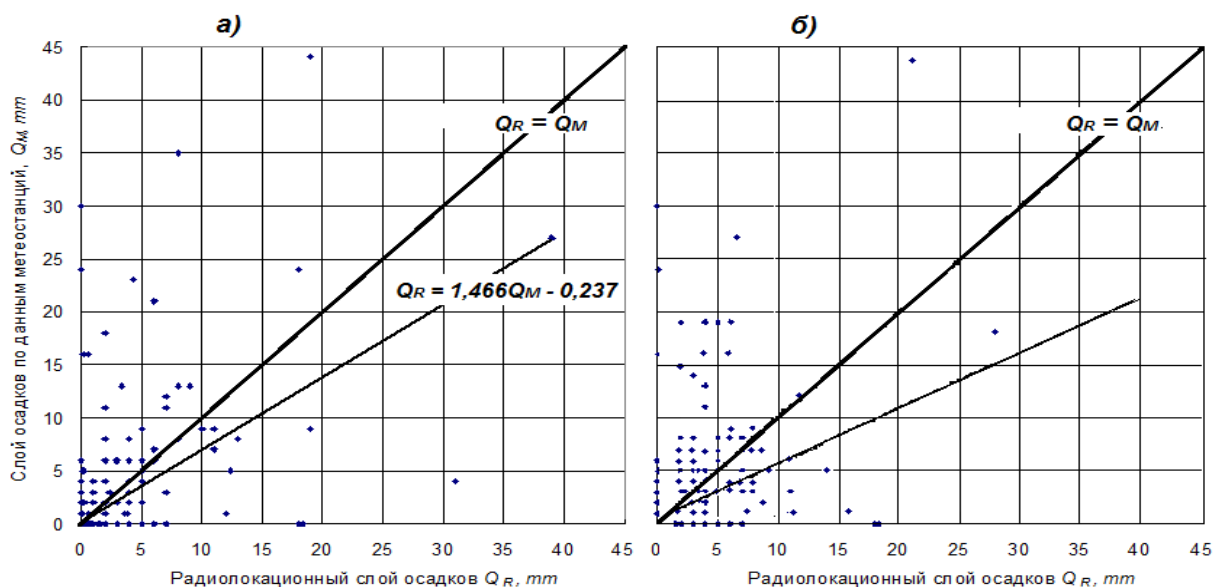


Рис. 4. Слой осадков за 12 часов по данным сети метеостанций ( $Q_M$ ) и данным Ставропольского (а) и Волгоградского (б) «ДМРЛ-С» ( $Q_R$ ). Пунктирная линия – линия тренда экспериментальных данных, а сплошная – линия согласования данных «ДМРЛ-С» и метеостанций.

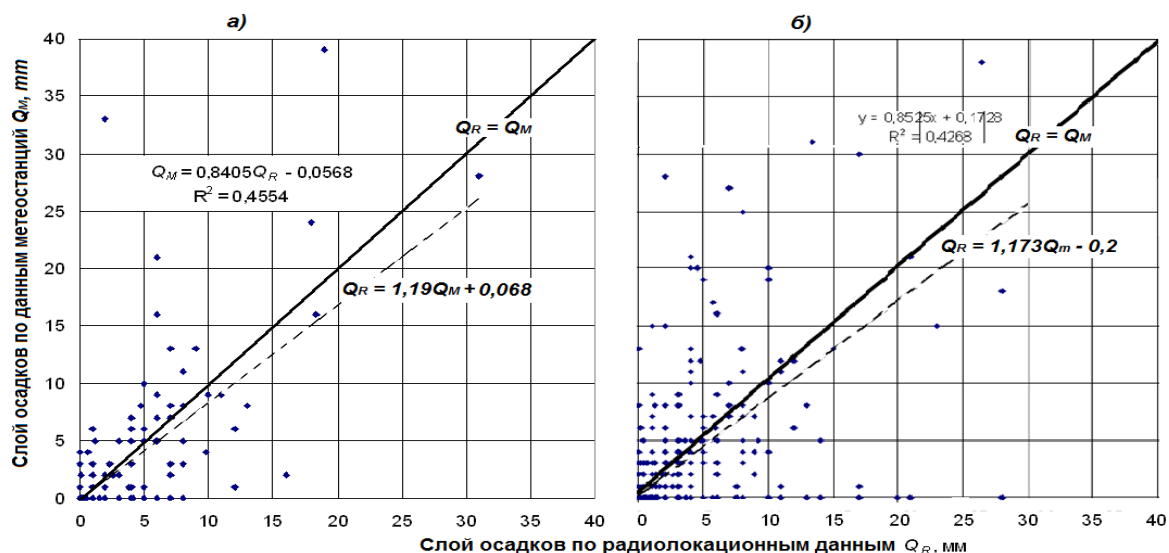


Рис. 5. Слой осадков за 24 часа по данным сети метеостанций ( $Q_M$ ) и данным Ставропольского (а) и Волгоградского (б) «ДМРЛ-С» ( $Q_R$ ). Пунктирная линия – линия тренда экспериментальных данных, а сплошная – линия согласования данных «ДМРЛ-С» и метеостанций.

На рис. 4 и 5 видно, что разброс значений количества осадков  $Q_M$  и  $Q_R$  довольно существенный и коэффициент корреляции между ними составляет около 0,45. Одной из причин этого являются погрешности в измерениях осадкомеров, связанные, прежде всего, с систематическим недоучетом количества выпавших осадков, а также принципиальная неприменимость этих осадкомеров для измерения осадков, выпадающих в твердой фазе (снег, град, снежная крупа и т.д.) [6]. Применение подогрева приземной поверхности для растапливания выпавших осадков, не снимая принципиальных ограничений на применение метода измерения количества осадков, увеличивает недоучет собираемых осадков, за счет испарения и выноса испаряемых частиц возникающей конвекцией. Не менее существенным недостатком всех дозирующих устройств является и ограничение их применения для измерения осадков большой интенсивности, когда время формирования дозы меньше, чем время слива. Важно также учитывать значение площади сбора осадков, так как метеостанции или плювиографы, находящиеся на небольшом расстоянии друг от друга, зачастую выдают разные показания.

Наряду со случайным разбросом, отмечается также и систематическое завышение количества осадков по радиолокационным данным. Для устранения этого завышения необходимо ввести коррекцию на константы обоих ДМРЛ [1]:

- на Ставропольском «ДМРЛ-С» значение константы следует повысить на 1,23 dB, установив значение  $10lgC_M = 277,91$  dB, вместо 276,58 dB;
- на Волгоградском «ДМРЛ-С» следует повысить константу на 1,17 dB [2].

### **Зависимость расхождения $Q_M$ и $Q_R$ от расстояния**

Среднее значение отклонения радиолокационных данных о суммарных осадках по данным метеостанций за 12 и 24 часа соответственно представлены на рис. 6 и 7. На этих рисунках просматривается тенденция уменьшения точности радиолокационных измерений в зависимости от расстояния.

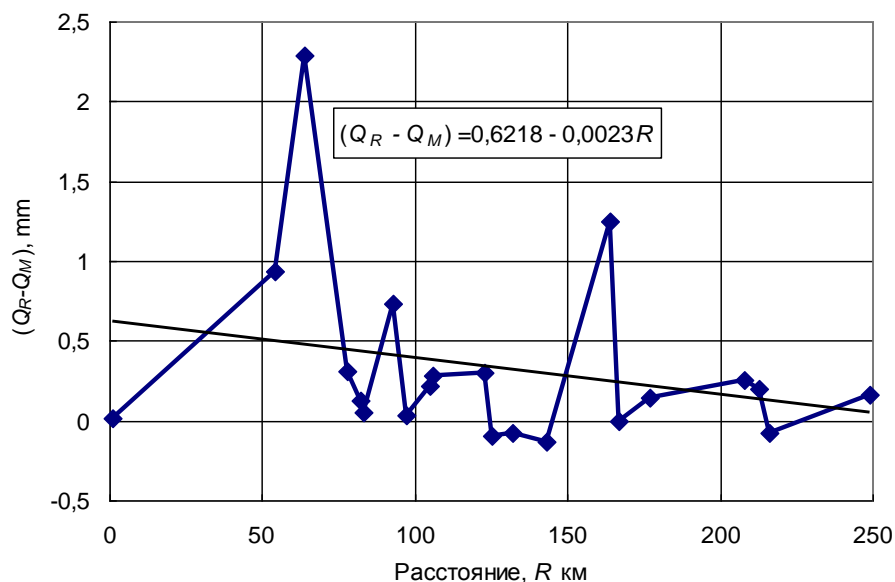


Рис. 6. Зависимость от расстояния расхождения полусуточных сумм осадков по данным сети метеостанций и Ставропольского «ДМРЛ-С».

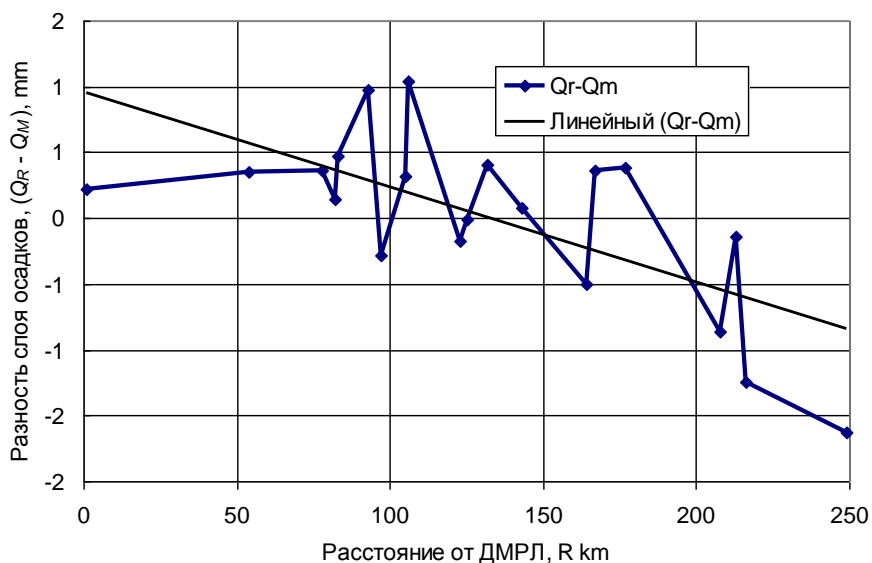


Рис. 7. Зависимость от расстояния расхождения суточных сумм осадков по данным сети метеостанций и Ставропольского «ДМРЛ-С».

Причинами снижения точности радиолокационного измерения осадков с расстоянием являются следующие факторы:

**Удаление радиолуча от поверхности земли** вследствие различия кривизны радиолуча и поверхности земли приводит к тому, что даже при стандартной рефракции луч, с увеличением расстояния, все выше поднимается над поверхностью земли и на расстоянии

более 150 км практически не охватывает зону осадков. Такой «перелет» радиолуча приводит к занижениям площади, интенсивности и количества осадков, размера и кинетической энергии града, нарастающим с расстоянием, а на расстоянии около 200 км осадки вообще могут не обнаруживаться. В случае слоисто-дождевых облаков луч может охватывать «яркую линию» таяния снега даже при нулевых углах сканирования, что приводит к завышению отражаемости от 5 до 16 dB и количества осадков до 5 раз.

**Коэффициент заполнения радиолуча ( $K_L$ )**, в связи с уширением радиолуча с расстоянием [3]  $K_L$ , является функцией его ширины, расстояния и тангенциальных размеров цели, т.е.  $K_L = f(R, \theta, l)$ . Обычно полагают  $K_L = 1$ , но это справедливо только в случае обширных полей однородных осадков из слоисто-дождевых облаков и высоком уровне линии таяния снега. В случае кучево-дождевых облаков  $K_L$  уменьшается с расстоянием, так как области высокой отражаемости могут не заполнять зондирующий объем. На удалении  $R = 200$  км при  $\theta = 1,0$  градус диаметр луча достигает 3,5 км, а при  $\theta = 1,5$  градуса – 5,2 км. Локальные максимумы отражаемости в случае грозоградовых облаков часто имеют поперечник меньше 3 – 5 км [4], радиолуч охватывает области более низкой отражаемости и значение  $Z_{max}$  может быть занижено на несколько dBZ (например, при  $K_L = 0,5$  на  $10 \lg K_L = 3$  dB, а при  $K_L = 0,3$  на  $10 \lg K_L = 5,2$  dB). Эти занижения отражаемости и интенсивности осадков нарастают с расстоянием, кроме того, размазываются градиенты отражаемости, занижаются высоты повышенного радиоэха и т.д. Таким образом, допущение  $K_L = 1,0$  может быть одним из серьезных источников расхождений данных соседних ДМРЛ и ошибок радиолокационных измерений осадков. Корректный учет этого фактора в зависимости от масштаба неоднородностей облаков, имеющих региональные различия, требует дальнейшей проработки.

Следует отметить, что погрешности измерения осадков, связанные с «перелетом» и уширением луча, закрытием обзора, охватом «яркой линии» таяния снега могут значительно превосходить погрешности, связанные с вариацией параметров  $A$  и  $b$  соотношения  $Z = A I^b$ . Для минимизации занижения количества осадков за счет «перелета» луча, а также исключения «дыр» над горами и за ними предлагается измерение осадков осуществлять в 1 км слое над уровнем основания радиоэха, а не в горизонтальном сечении приземного слоя.

**Аномальная рефракция радиоволн**, особенно суперрефракция, связанная с выхолаживанием приземного слоя атмосферы за счет радиационных потерь почвы в безоблачные ночи, а также за счет испарения осадков, приводит к обнаружению радиоэха местных предметов ниже радиогоризонта [5]. Без фильтрации аномального радиоэха они могут интерпретироваться как очаги осадков, гроз и даже града. Эти ложные очаги являются серьезной помехой при автоматизированных наблюдениях и могут создавать большой слой ложных осадков. Аномальная рефракция приводит также к искажению высот радиоэха.



## **Выводы**

На данном этапе работы, для точной оценки степени схождения радиолокационных данных с данными метеостанций, необходим полный и детальный анализ каждого конкретного случая. В целом нами была выявлена тенденция основных расхождений в показаниях наземных метеостанций и радиолокационных данных:

- 1) в зависимости от расстояния наблюдается тенденция к занижению показаний локатора;
- 2) автоматизированная радиолокационная система требует доработок в области вычитания сигналов от местных предметов;
- 3) метеостанции также вносят систематическую погрешность, связанную с низкой точностью осадкомеров.

Нами был разработан новый тип плювиографа - плювиограф кровельного типа, который уменьшит погрешность измерения количества и интенсивности осадков за счет увлечения площади сбора осадков.

## **Список литературы**

1. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Малкарова А.М., Барекова М.В. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик, 2014. с 234.
2. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Гергоков А.Х., Чочаев А.Б., Геккиева Ж.М. Методы калибровки метеорологических радиолокаторов. Метеорология и гидрология. 2017. № 3. с. 114-121.
3. Абшаев М.Т., Бурцев И.И., Ваксенбург С.И., Шевела Г.Ф. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. Л.-, 1980 ,с.105-109.
4. Жарашуев М.В., Гергоков А.Х. Методика автоматической идентификации площадки засева градовых облаков. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2015. № 3 (187). С. 25-30.
5. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Гергоков А.Х. Фильтрация аномального радиозэха при радиолокационных наблюдениях облаков и осадков. /Тезисы конференции молодых ученых ВГИ, посвященной 100-летию проф. Г. К. Сулаквелидзе. 22-23 мая 2013год стр 9-11
6. Инюхин В.С., Макитов В.С., Суслов В.В. Сопоставительный анализ данных радиолокационных и наземных измерениях ливневых осадков. Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 1 (51). С. 52-60.
7. Всемирная Метеорологическая Организация, 1996 г.: Руководство по метеорологическим и методам наблюдений (ВМО-№8), шестое издание, часть I, глава 6, Женева.

**Научное издание**

**ДОКЛАДЫ  
ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
ПО ФИЗИКЕ ОБЛАКОВ И АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ  
НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

**Сборник научных трудов**

**В авторской редакции**

Издательство не несет ответственности за опубликованные материалы.

Все материалы отображают персональную позицию авторов.

Мнение Издательства может не совпадать с мнением авторов

Подписано в печать 20.09.2017 г. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 20,6. Тираж 350. Заказ 652.



**АЭТЕРНА**

НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

**Отпечатано в редакционно-издательском отделе  
НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «АЭТЕРНА»**

**450076, г. Уфа, ул. М. Гафури 27/2**

**<http://aeterna-ufa.ru>**

**[info@aeterna-ufa.ru](mailto:info@aeterna-ufa.ru)**

**+7 (347) 266 60 68**