



На правах рукописи

Шогенова Марьяна Мухарбиевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЬДООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ
ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ
ЛЬДООБРАЗУЮЩИХ ЯДЕР**

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НАЛЬЧИК – 2004

Работа выполнена в Кабардино-Балкарском Государственном университете им. Х.М. Бербекова и ГУ "Высокогорный Геофизический институт" Росгидромета

- Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,
профессор **Тлисов Мухамед Индрисович**
- Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук
Бейтуганов Мусаби Ногманович
- доктор физико-математических наук,
профессор **Шокаров Хасанби Баширович**
- Ведущая организация:** Институт экспериментальной метеорологии
НПО "Тайфун",
г. Обнинск, Калужской области

Защита состоится "29" октября 2004 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д. 327.001.01 при ГУ "Высокогорный геофизический институт" Росгидромета по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ "Высокогорный геофизический институт" Росгидромета.

Автореферат разослан "29" сентября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор географических наук



В.В. Разумов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Льдообразующие ядра – это особый вид аэрозольных частиц, имеющих определенные химические, кристаллографические, размерные, электрические и другие свойства, позволяющие инициировать образование льда на своей поверхности. Льдообразующее ядро должно обладать всей совокупностью перечисленных выше свойств. Именно поэтому такие частицы очень редки в атмосфере, их концентрация чрезвычайно мала и изменчива.

Искусственные льдообразующие реагенты в настоящее время являются наиболее эффективным средством для искусственного воздействия на градообразования. Значение их особенно возросло с развитием методов оперативного воздействия, основанных на использовании автономных генераторов аэрозоля, транспортируемых непосредственно в зону воздействия. С их помощью при сравнительно незначительных расходах реагента в конвективных облаках можно создать необходимое количество искусственных льдообразующих зародышей града.

Йодистое серебро (AgI) до сих пор остается самым эффективным льдообразующим реагентом. Измеренный максимальный выход активных частиц на единицу веса AgI существенно превосходит соответствующие выходы для всех других реагентов этого типа при всех температурах активации.

В последние годы развивается исследование естественных и искусственных аэрозолей, что обусловлено рядом важных научных и прикладных задач.

Эти работы проводятся в нескольких направлениях:

1. Изучение влияния естественных и искусственных аэрозолей на процессы облако- и осадкообразования.
2. Изыскание возможностей использования различных естественных и искусственных аэрозолей для регулирования выпадения осадков, а также воздействия на грозо-градовые процессы.

Все эти исследования тесно связаны с проблемой управления атмосферными процессами и имеют актуальное значение для народного хозяйства страны и являются предметом исследования в данной работе.

Цель работы. Целью работы является исследование влияния пересыщения и температуры окружающей среды на размер и концентрацию естественных льдообразующих ядер, изучение льдообразующих свойств аэрозольных осадков, содержащихся в градинах. Исследование концентрации атмосферных льдообразующих ядер в облаках и их окрестностях. Исследование конденсационных и льдообразующих свойств растворов солей тетрабутиламмония бромида и иодида в зависимости от спектра их размеров и концентрации. Разработка и внедрение новых устройств для распыления жидкости в атмосферу, которые позволяют вводить микродозы аэрозоля реагента при проведении лабораторных исследований.

Для достижения этой цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- анализ и обобщение данных о концентрации льдообразующих ядер в облаках и атмосфере по результатам самолетных исследований;
- исследование влияния пересыщения и температуры на льдообразующие свойства аэрозолей различных размеров и концентраций, исследование льдообразующих свойств аэрозольных частиц, содержащихся в градинах;
- экспериментальное исследование конденсационных свойства растворов солей тетрабутиламмония бромида и иодида;
- исследование льдообразующих свойств солей тетрабутиламмония бромида и иодида, растворенных во фреоне 134a;
- разработка и использование в лабораторных условиях генераторов атмосферных аэрозолей.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- впервые определены оптимальные пороговые уровни концентрации солей тетрабутиламмония бромида и иодида, растворенных во фреоне, позволяющие получить максимальный выход ледяных кристаллов;
- впервые разработаны и внедрены устройства для введения жидкого аэрозоля в облачную камеру, позволяющие моделировать процесс воздействия льдообразующих частиц на облачную среду. Разработанные устройства отличаются от известных, простотой конструкции и возможностями, обеспечивающими внесение микродоз жидкого реагента в камеру исследования облачных процессов. Эти устройства защищены патентами РФ.

Практическая ценность представленной работы состоит в том, что:

- полученные результаты по исследованию естественных льдообразующих ядер позволяют определить их влияние на образование града в облаках и интенсивность его образования;
- результаты, полученные по исследованию растворов солей тетрабутиламмония бромида и иодида показали, что растворы этих солей имеют высокий выход кристаллов порядка 10^{11} г^{-1} , высокую скорость проявления ледяных кристаллов 10-15 с и высокую пороговую температуру – $-1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет рекомендовать их использование для активного воздействия на туманы и облака;
- разработанные устройства для распыления растворов реагентов под давлением обеспечивали условие внесения в камеру микродоз жидкого реагента для исследования облачных процессов.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

- результаты исследования естественных льдообразующих ядер, находящихся в облаке и около облачном пространстве;

- результаты исследования льдообразующих и конденсационных свойств солей тетрабутиламмония бромида и иодида, растворенных во фреоне 134а;
- устройства для внесения жидкого реагента, позволяющие контролировать количество внесенного реагента в облачную камеру.

Личный вклад автора. Автором работы при научном руководстве руководителя были получены следующие результаты:

1. Систематизированы и обобщены материалы по исследованию концентрации естественных льдообразующих ядер в зависимости от температуры, пересыщения и размера.

2. Исследованы льдообразующие и конденсационные свойства растворов солей тетрабутиламмония во фреоне 134а.

3. Разработаны устройства для распыления жидких реагентов в атмосферу, которые защищены патентами РФ.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались на:

- Межрегиональной конференции молодых ученых «Перспектива». – Нальчик, 2002;
- Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям гидрометеорологические процессы. – Нальчик, 2001;
- Конференция молодых ученых КБНЦ РАН. – Нальчик 2002;
- Региональной конференции «Теоретические и прикладные проблемы современной физики». – Ставрополь, 2002;
- Конференции молодых ученых Высокогорного геофизического института, посвященной 90-летию Г.К. Сулаквелидзе. – Нальчик, 2003.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы составляет 145 страниц машинописного текста, включая 25 рисунка, 17 таблиц. Список литературы содержит 109 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формируются цели и задачи диссертационной работы, приводится научная и практическая значимость, новизна полученных результатов, а также апробация работы.

В первой главе дается анализ основных работ о происхождении, источниках, размере, географическом распределении, температурном пороге образования кристаллов и других свойствах естественных льдообразующих ядер. Также дается краткая характеристика состояния исследования льдообразующей активности органических льдообразователей и веществ с клатратной структурой.

Из проведенного анализа следует, что источником основной части общей массы аэрозольного материала в атмосфере являются природные и антропогенные источники Земли. При этом аэрозольная компонента атмосферы формируется, в основном, с помощью двух механизмов превращения: 1) газ – частица и 2) механическое дробление твердой и водной поверхности Земли, выделения в атмосферу промышленных, транспортных выбросов и частиц растительного происхождения. Диапазон размеров атмосферных частиц весьма широк – от 10^{-2} мкм до нескольких сотен микрометров. Эксперименты, проведенные многими исследователями, показали, что существует сезонная зависимость концентрации льдообразующих ядер в атмосфере.

Приборы и методика, которые использовались для исследования льдообразующих ядер, не реализовывали все возможные механизмы нуклеации льда. Во всех приборах наиболее слабым звеном являлось получение, и поддержание в течение длительного времени температуры и пересыщения с необходимой точностью.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о том, что в атмосфере преобладает гетерогенный механизм образования льда. Образование зародышей льда на льдообразующих частицах может происходить в результате:

1. Сублимации – образования ледяного зародыша на аэрозольной частице из паровой фазы.
2. Конденсации с последующим замерзанием.
3. Контактной нуклеации, происходящей путем столкновения сухой частицы с переохлажденной каплей.
4. Объемного замерзания – замерзания под действием аэрозольных частиц, погруженных в капли.

Выражение для критического значения свободной энергии при образовании из пересыщенного пара куполообразного единичного микроскопического зародыша твердой фазы на плоской поверхности субстрата имеет вид:

$$\Delta F^* = \frac{16\pi\sigma_{nl}^3 L^2}{3(\kappa T)^3 \ln^2(P/P_0)} f(m), \quad (1)$$

где L – молекулярный объем зародыша; член $f(m) = \frac{(2+m)(1-m)^2}{4}$ характеризует влияние субстрата на величину свободной энергии формирования критического зародыша; m – параметр нуклеации льда.

Уравнение (1) получено, исходя из гипотезы изотропности поверхностного натяжения твердой фазы по аналогии со случайным зародышем жидких капель на твердой поверхности.

Выражение для скорости гетерогенной нуклеации в общем виде имеет вид:

$$I = A \exp\left(-\frac{\Delta F^x}{kT} \cdot f(m)\right). \quad (2)$$

Льдообразующие аэрозоли являются одним из основных средств искусственного воздействия на переохлажденные облака и туманы. Понятен интерес к изысканию новых реагентов для воздействия на градовые процессы.

Поиски эффективных льдообразующих реагентов долгое время ограничивались классом неорганических веществ. По сравнению с неорганическими веществами более значительные возможности в изыскании новых льдообразующих реагентов представляет класс органических соединений. Эти вещества обладают в среднем более высокой льдообразующей активностью, чем неорганические. Первым из числа органических льдообразующих реагентов, попавших в поле зрения исследователей, был флороглоцин, пороговая температура образования кристаллов которого около -6°C . Максимальный выход кристаллов флороглоцина на порядок величины меньше выхода AgI , но весьма близок к соответствующей величине PbI_2 .

Наибольший интерес среди обширного класса соединений-гидратов – представляют вещества, не подчиняющиеся законом валентности – это так называемые нестехиометрические соединения. К ним относятся клатраты, цеолиты, высокомолекулярные полимеры.

Клатраты – это комплексные соединения, состоящее из двух или более компонентов. Они отличаются от других комплексных соединений тем, что молекулы их компонентов соединяются без обычной химической связи. Кристаллическая структура клатратов оказывается устойчивой не только при отрицательных температурах, но и близких к нулю положительных, что является существенным свойством для растворов реагентов при воздействии на градовые и на другие конвективные процессы.

Во второй главе рассмотрены аппаратура и методика исследования естественных и искусственных льдообразующих ядер. Для исследования естественных льдообразующих ядер в ВГИ была разработана и запатентована термодиффузионная камера, которая позволяла регулировать в рабочем объеме одновременно температуру и пересыщение. В результате в камере можно было наблюдать возникновение и рост ледяных кристаллов, а также их испарение. Изменяя разность температур между поверхностями, можно было менять скорость роста или испарения кристаллов.

Забор проб естественного аэрозоля осуществлялся трехкаскадным импактором, который позволял исследовать льдообразующие свойства, микроструктурные характеристики аэрозолей по фракциям в облаках и в чистой атмосфере.

Для введения в облачную камеру искусственного аэрозоля были разработаны устройства для распыления жидкости в атмосферу и для распыления жидкости под давлением. Эти устройства имели упрощенную конструкцию и более расширенные функциональные возможности, которые обеспечивали условия внесения в камеру исследования облачных процессов микродоз жидкого реагента на уровне объемов 10^{-2} - 10^{-1} мм³. В отличие от известных устройств эти устройства обеспечивали управление и контроль за расходом жидких реагентов при распылении в малых дозах.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований

Исследованию естественных льдообразующих ядер посвящено большое количество работ. Однако, из полученных различными авторами кривых зависимости концентрации от температуры нельзя оценить вклад того или иного механизма нуклеаций. Учитывая это, нами были проведены исследования льдообразующих свойств естественного аэрозоля в зависимости от температуры, пересыщений надо льдом и размеров аэрозольных частиц.

Забор проб осуществлялся трехкаскадным импактором, в котором происходило разделение частиц по размерам. Пробы естественного аэрозоля брались в приземном слое атмосферы в антициклональную погоду в течение нескольких дней и исследовались при температурах -8, -12, -15, -20°C.

На рис.1 приведены осредненные кривые концентрации льдообразующих ядер (ЛОЯ) в зависимости от перенасыщений надо льдом для каждой фракции размеров (по каскадам) и для суммы всех частиц

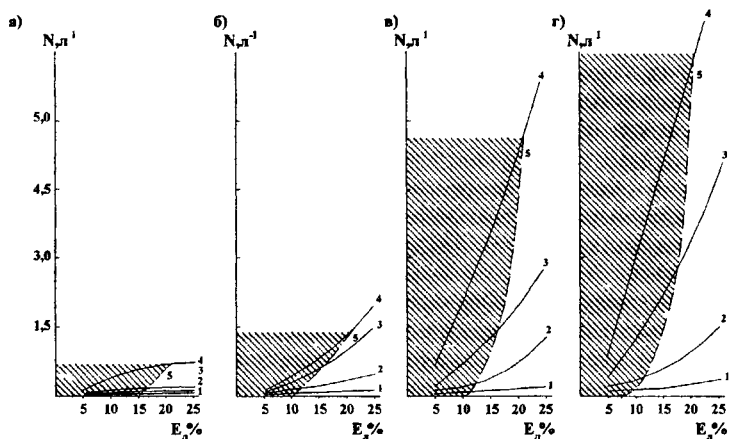


Рис. 1. Зависимость концентрации льдообразующих ядер в зависимости от температуры и пересыщения надо льдом

(а – первый каскад $d=10$ мкм; б – второй каскад $d=3,7$ мкм; в – третий каскад $d=0,1$ мкм; г – сумма всех частиц)

Анализ приведенных кривых показывает, что в отличии от результатов, полученных ранее, концентрация ЛОЯ зависит не только от пересыщения надо льдом, но и от температуры. Наклон кривых возрастает с понижением температуры пересыщений, т.е. зависимость льдообразования от температуры возрастает с ростом пересыщения. Влияние пересыщения больше сказывается на частицах меньшего размера. Из графика также видно, что чем ниже температура, тем больше экспериментальных точек на кривых находится в области недосыщения относительно воды.

Из анализа приведенных кривых можно сделать вывод, что при температуре -8°C основным механизмом является конденсация – замерзание. При понижении температуры наблюдается постоянное увеличение вклада сублимационного механизма, который при -20°C по-видимому становится преобладающим.

Осредненные концентрации естественных льдообразующих ядер разных размеров, активных при различных температурах и насыщениях над водой, приведены в табл.1.

Таблица 1

Концентрация ЛОЯ (л^{-1}) разного размера, активных при различных температурах и насыщениях над водой (в знаменателе указан процентный вклад ядер каждой фракции размеров в общую концентрацию ЛОЯ)

| Диаметр ядер, мкм | Температура, $^{\circ}\text{C}$ | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | -8 | -10 | -12 | -15 | -20 |
| 100 | <u>0,030</u> 17 | <u>0,038</u> 15 | <u>0,039</u> 8 | <u>0,040</u> 2 | <u>0,048</u> 4 |
| 30 | <u>0,061</u> 35 | <u>0,070</u> 27 | <u>0,082</u> 17 | <u>0,110</u> 4 | <u>0,320</u> 4 |
| 10 | <u>0,052</u> 30 | <u>0,060</u> 23 | <u>1,080</u> 16 | <u>0,190</u> 8 | <u>0,700</u> 10 |
| 1,0 | <u>0,020</u> 12 | <u>0,045</u> 17 | <u>0,100</u> 20 | <u>0,670</u> 28 | <u>1,300</u> 18 |
| 0,1 | <u>0,010</u> 6 | <u>0,048</u> 18 | <u>0,020</u> 41 | <u>1,400</u> 58 | <u>4,900</u> 67 |
| Общая концентрация | <u>0,173</u> 100 | <u>0,261</u> 100 | <u>0,491</u> 100 | <u>2,410</u> 100 | <u>7,268</u> 100 |

Как видно из табл.1, при высоких температурах активны гигантские и сверхгигантские ядра, при понижении температуры возрастает активность мелких частиц, а при -20°C их вклад становится преобладающим. При -10°C концентрация ЛОЯ всех размеров практически одинакова.

В ходе экспериментов были исследованы конденсационные свойства льдообразующих ядер различных размеров.

Формула для определения скорости роста капли на гироскопических ядрах конденсации будет иметь вид:

$$\frac{R_n \rho_k}{D} r \frac{dr_k}{dt} = \frac{I_\infty}{T_\infty} - \frac{E(T_\infty)}{T_\infty} \left[1 - C_m \left(\frac{r_0}{r_k} \right)^3 \right] \times \exp \left[\frac{2\sigma}{R_n \rho_k r_k T_k} + \frac{\alpha L}{AR_n T_\infty (1 + \alpha)} \right], \quad (3)$$

где C_m – константа, зависящая от физической природы растворенного вещества;

r_0 – радиус капли в тот момент, когда раствор соли остается еще насыщенным;

σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе капля-воздух.

Это трансцендентное относительно $\frac{dr}{dt}$ уравнение было положено

М. Нуйбургером и К. Чином в основу расчета скорости роста капель на гироскопических частицах.

Рассмотрим другой подход. Обратимся сразу к "зрелому облаку", опуская из рассмотрения стадию формирования облачных частиц, чтобы можно было пренебречь влиянием ядер конденсации и зависимостью давления насыщенного пара от кривизны поверхности. Тогда для скорости роста капли можно использовать уравнение

$$\frac{dr_k}{dt} = \frac{D \rho_{ax}}{r_k \rho_k} \cdot \frac{\mu E_s}{p} (f - 1) \frac{\gamma(Re)}{1 + \nu_k}, \quad (4)$$

$$\gamma(Re) = 1 + 0.24 \sqrt{Re}, \quad (5)$$

$$\nu_k = \frac{D \mu^2 L^2 \rho_{ax} E_s}{\kappa N_A M T^2 \lambda p}, \quad (6)$$

r_k – радиус капли, t – время, D – коэффициент молекулярной диффузии пара, ρ_k и ρ_{ax} , μ и M плотности и молярные массы капли и воздуха соответственно, E_s – давление насыщенного водяного пара над водой, p – давление, f – относительная влажность в облаке, κ – постоянная Больцмана, N_A – число Авогадро, $\gamma(Re)$ – безразмерный коэффициент вентиляции.

Результаты, полученные входе эксперимента по исследованию конденсационного роста капель были сравнены с результатами расчетов, полученными по формулам (3) и (4) при различных значениях первоначального размера капли (ядра) (рис. 2).

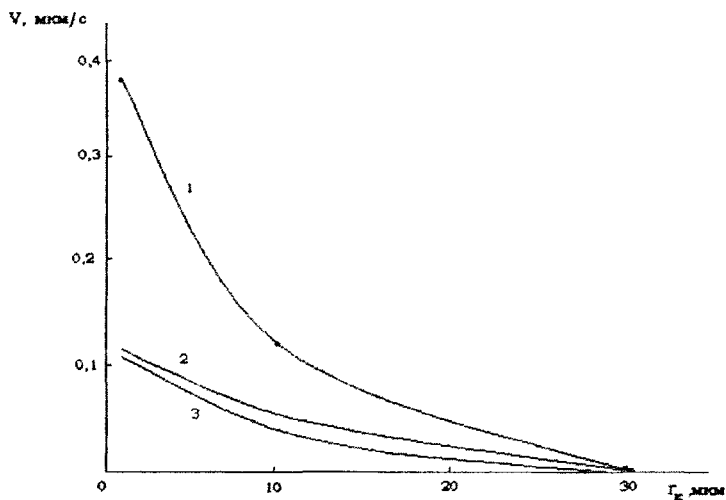


Рис. 2. Зависимость скорости конденсационного роста капли от её первоначального размера
 (1 – кривая полученная по экспериментальным данным;
 2 – кривая полученная по формуле (3);
 3 – кривая полученная по формуле (4))

Рис. 2 показывает, что с увеличением первоначального размера капли скорость её конденсационного роста уменьшается.

На рис.3 приводятся кривые концентрации ЛОЯ в зависимости от температуры для отдельных каскадов импактора и суммы всех частиц при насыщении над водой. Из приведенных характеристик кривых видно, что концентрация ЛОЯ с $d = 100$ мкм при $t = -8^\circ\text{C}$ больше, чем концентрация ЛОЯ более мелких частиц при такой же температуре. Т.о. подтверждается вывод о большом вкладе сверх гигантских частиц при $t = -8^\circ\text{C}$ в общую концентрацию. Из графиков рис.3 видно, что наклон кривых для суммы всех частиц качественно совпадает с аналогичными кривыми, полученными другими авторами с помощью других методов, и в первом приближении удовлетворительно описывается выражением

$$N = N_0 \exp(\beta \Delta T). \quad (7)$$

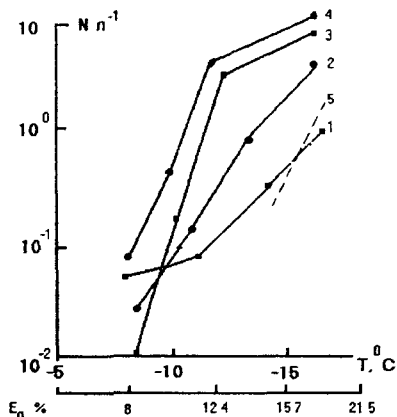


Рис. 3. Зависимость концентрации льдообразующих ядер от температуры и пересыщений относительно льда (насыщении над водой) (1 – первый каскад импактора; 2 – второй каскад; 3 – третий каскад; 4 – сумма всех частиц; 5 – прямая Флетчера).

С увеличением размеров частиц наклон кривых уменьшается. Коэффициент β в формуле (7) равен 0,8- для частиц с $\bar{d} = 0,1$ мкм, 0,7- для частиц $\bar{d} = 3,7$ мкм и 0,28- для частиц $\bar{d} = 10$ мкм.

Льдообразующие ядра являются центрами образования ледяных кристаллов, служащих строительным материалом для градин. В табл. 2. приведены определенные концентрации льдообразующих ядер на 1 см^3 льда зародышей градин обоих видов для разных температур активации. Анализ показывает, что концентрация активных ядер в капельных зародышах в температурном интервале от -6 до -12 °C примерно в три раза выше чем в крупяных. При понижении температуры до -14 - -20 °C концентрация льдообразующих ядер в капельных зародышах примерно в шесть раз выше, чем в крупяных.

Таблица 2
Концентрация льдообразующих ядер в зародышах градин ($n \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$)

| Температура активации, °C | -6 | -8 | -10 | -12 | -14 | -16 | -18 | -20 |
|---------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Зародыш капля | 0,03 | 0,12 | 0,22 | 0,48 | 0,80 | 1,30 | 1,50 | 1,70 |
| Зародыш крупа | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,096 | 0,14 | 0,19 | 0,24 | 0,30 |

Интервал пороговых температур льдообразования аэрозольных осадков, соответствующих различным слоям роста градин, достаточно широк (от -4 до -16°C), тогда как примерно 50 % зародышей обоих типов содержат частицы с порогом льдообразования -6°C . Эта точка является практически общим пределом льдообразования для атмосферных аэрозолей по сублимационному механизму. Для объяснения этого факта были проведены специальные исследования, результаты которых показаны на рис. 4, где приведены осредненные интегральные кривые льдообразований для частиц атмосферного аэрозоля в чистой атмосфере, под облаком и над облаком.

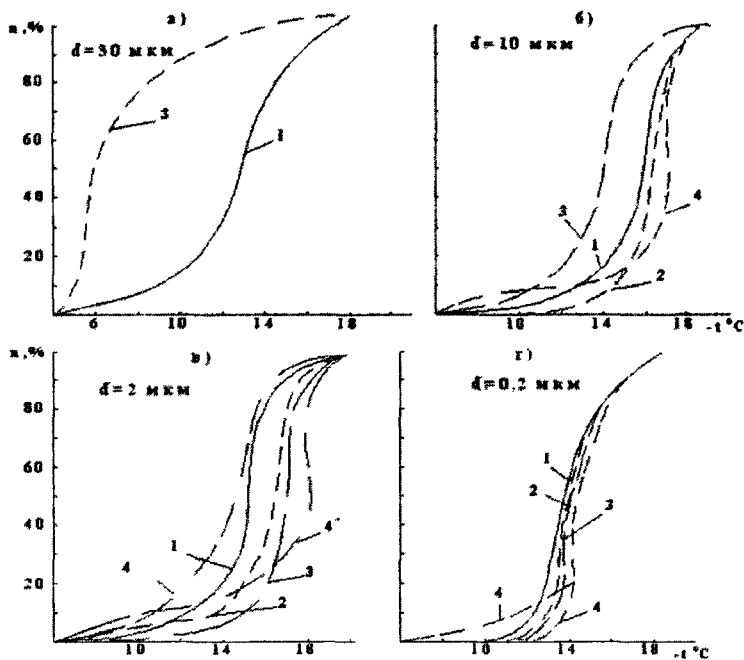


Рис. 4. Интегральные кривые вероятности льдообразования частиц атмосферного аэрозоля
 (1 – в чистой атмосфере; 2 – под облаком; 3 – в облаке;
 4 – над облаком; 4' – над облаком в Крыму)

Из рис. 4 видно, что активность частиц диаметром $\approx 0,2$ мкм практически одинакова во всех погодных условиях. Частицы $d \approx 2$ мкм над облаком обладают более высокой льдообразующей активностью, чем частицы, находящиеся в свободной атмосфере, а в облаке и под ним активность этих частиц снижается, что наиболее выражено при низких температурах.

Льдообразующие аэрозоли – одно из основных средств искусственного воздействия на переохлажденные облака и туманы.

В ВГИ разработаны новые экологически чистые реагенты, представляющие собой растворы солей тетрабутиламония бромида (R_1) и тетрабутиламония йодида (R_2) в экологически чистом фреоне.

Исследуемые соли имеют полуклатратную структуру.

Рассмотрим случай тетрабутиламония бромида. Молекула R_1 , попадая в пар, диссоциирует. Анион (Br^-) встраивается в кристаллическую структуру воды, а катион (алкидный радикал) размещается в полости уже водноанионной, а не водной решетки, тем самым, стабилизируя кристаллическую структуру воды и понижая давление над ней. Мы считаем, что именно этим объясняется высокий порог кристаллизации и высокий выход ледяных кристаллов.

Опыты по определению льдообразующей эффективности проводились при определенных температурах в облачной камере ($-1,5$ - $-10^\circ C$) для различных растворов солей и чистого фреона. В результате проведенных экспериментов установлено, что среднее значение удельного выхода ледяных кристаллов с одного грамма реагента R_1 составляет $1,2 \cdot 10^{11} \text{ г}^{-1}$, реагента R_2 – $3,9 \cdot 10^{11} \text{ г}^{-1}$ для чистого фреона- $2 \cdot 10^{10} \text{ г}^{-1}$. На графике (рис. 5) приведены зависимости средних значений удельного выхода кристаллов от температуры в камере для реагентов R_1 , R_2 и чистого фреона, при доверительном уровне 0,95. При пересчете на соль льдообразующая активность составляет 10^{13} г^{-1} . Выход ледяных кристаллов растворов солей R_1 и R_2 почти не зависит от концентрации раствора.

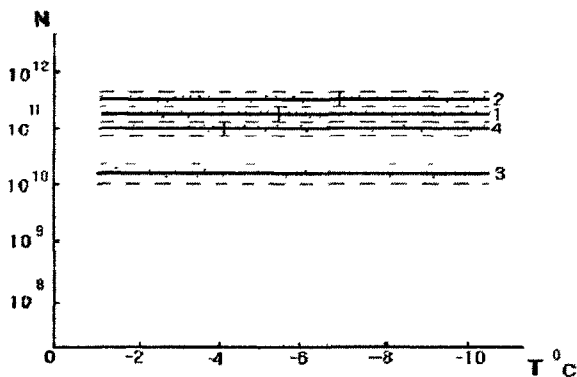


Рис. 5. Льдообразующая активность растворов солей R_1 , R_2 , фреона 134a
1 – среднее значение льдообразующей активности R_1 ;
2 – среднее значение льдообразующей активности R_2 ;
3 – среднее значение льдообразующей активности фреона 134a;
4 – среднее значение льдообразующей активности R_1 ,
полученное при использовании нового дозатора).

Температура, при которой появляются кристаллы при введении в переохлажденный пар растворов солей R_1 и R_2 (порог кристаллизации) близка к 0°C . Определение порога кристаллизации, в этой области температур связано с большими трудностями, поэтому в наших экспериментах четко фиксируется пороговая температура -1°C .

Известно, что исследуемые соли кроме льдообразующих свойств обладают высокими конденсационными свойствами. Исследование конденсационных свойств растворов солей проводили с помощью термодиффузионной камеры «Град-3». Результаты экспериментов приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты исследования растворов солей

| R_1 | | | R_2 | | | $NaCl$ | | |
|-------|-----|-------------|-------|---------|-------------|--------|----|-----------|
| I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| 0 | 15с | | 0 | 1 мин | | 0 | 5с | |
| 0 | 1с | | 0 | 5 мин | | 0 | 3с | |
| 0 | 10с | | 0 | 5 мин | | 0 | 5с | |
| 0 | 2с | | 0 | 2 мин | | 0 | 0с | |
| 0 | 5с | 10^{12} - | 0 | 3,5 мин | 10^{12} - | 0 | 2с | 10^9 - |
| +1 | 3с | 10^{14} | +1 | 3 мин | 10^{14} | +1 | 7с | 10^{10} |
| +1 | 0с | | +1 | 5 мин | | +1 | 5с | |
| +1 | 5с | | +1 | 1 мин | | +1 | 3с | |
| +1 | 0с | | +1 | 1,5 мин | | +1 | 2с | |
| +1 | 3с | | +1 | 1,5 мин | | +1 | 0с | |
| +2 | 3с | | +2 | 3 мин | | +2 | 5с | |
| +2 | 10с | | +2 | 1 мин | | +2 | 3с | |
| +2 | 3с | | +2 | 5 мин | | +2 | 1с | |
| +2 | 0с | | +2 | 3 мин | | +2 | 1с | |
| +2 | 3с | | +2 | 2 мин | | +2 | 2с | |

Примечание: I – температура подложки, $^\circ\text{C}$;
 II – время появления ядер;
 III – средний выход центров, г^{-1} .

Эксперименты проводили при положительных температурах близких к 0°C и при пересыщении 102 %. Были исследованы конденсационные свойства аэрозолей R_1 и R_2 и хорошо известного, как гигроскопическое вещество – хлористого натрия.

Анализ результатов показывает, что капли на аэрозольных частицах NaCl и R_1 появляются в течение 1,5-2 секунд, а на частицах R_2 капли образуются значительно позже, через 2,5-3 минуты. Установлено, что с одного грамма раствора солей R_1 и R_2 получается 10^{12} - 10^{14} центров образования капель, а с одного грамма хлористого натрия образуется 10^9 - 10^{10} центров. Таким образом, по времени проявления ядер конденсации растворы солей R_1 и NaCl близки, в то же время число ядер конденсации с одного грамма R_1 больше на несколько порядков.

Проводилось сравнение раствора соли тетрабутиламмония во фреоне и реагента AgI по скорости проявления льдообразующих ядер. Рис. 6 показана зависимость количества кристаллов от времени их осаждения на подложку.

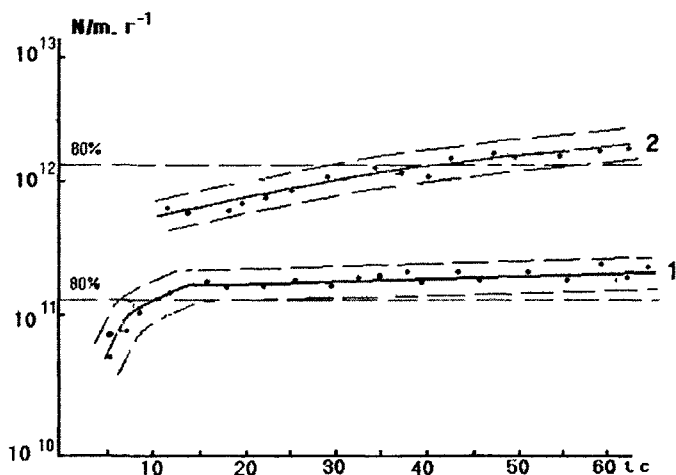


Рис. 6. Зависимость количества образовавшихся кристаллов от времени осаждения на подложку (1— для R_1 , 2— для AgI)

Как видно из графика, 80 % кристаллов выпадают на подложку за 10-15 секунд с момента внесения аэрозоля раствора соли R_1 в переохлажденный пар, в то время как при внесении аэрозоля йодистого серебра 80 % образующихся ледяных кристаллов выпадает через 40-50 сек. Это позволяет сделать вывод о том, что скорость проявления ядер раствора соли R_1 больше, чем ядер йодистого серебра.

Основные выводы и результаты работы

1. Исследована зависимость концентрации льдообразующих ядер от температуры и пересыщения, а также от размеров аэрозольных частиц. Эксперименты показали, что при температурах от -6 до -10 °С активны гигантские и сверхгигантские частицы, а с понижением температуры возрастает активность мелких частиц. Суммарная зависимость льдообразующей активности от температуры и пересыщения над льдом, имеющая место при 100 % влажности, удовлетворительно описывается формулой Флетчера.

2. В результате анализа обширного экспериментального материала получено, что над всеми районами Северного Кавказа с высотой происходит увеличение относительной льдообразующей активности аэрозолей. Из полученных вертикальных профилей льдообразующей активности видно, что гигантские частицы вносят значительный вклад в общую концентрацию ЛОЯ на всех высотах.

3. Установлено, что преобладающей пороговой температурой льдообразования для аэрозольных осадков, взятых из различных слоев роста градин, является температура -6 °С. Льдообразующая активность как атмосферного аэрозоля, так и частиц из зародышей градин возрастает с понижением температуры.

4. Исследована льдообразующая эффективность растворов солей тетрабутиламмония бромида и иодида, растворенных во фреоне. Выход кристаллов на один грамм раствора соли сравним с льдообразующей эффективностью AgI . Температурный порог льдообразования составляет $-1,5$ °С. Скорость проявления льдообразующих свойств раствора соли R_1 выше, чем AgI . Растворы этих солей можно использовать для воздействия на градовые процессы.

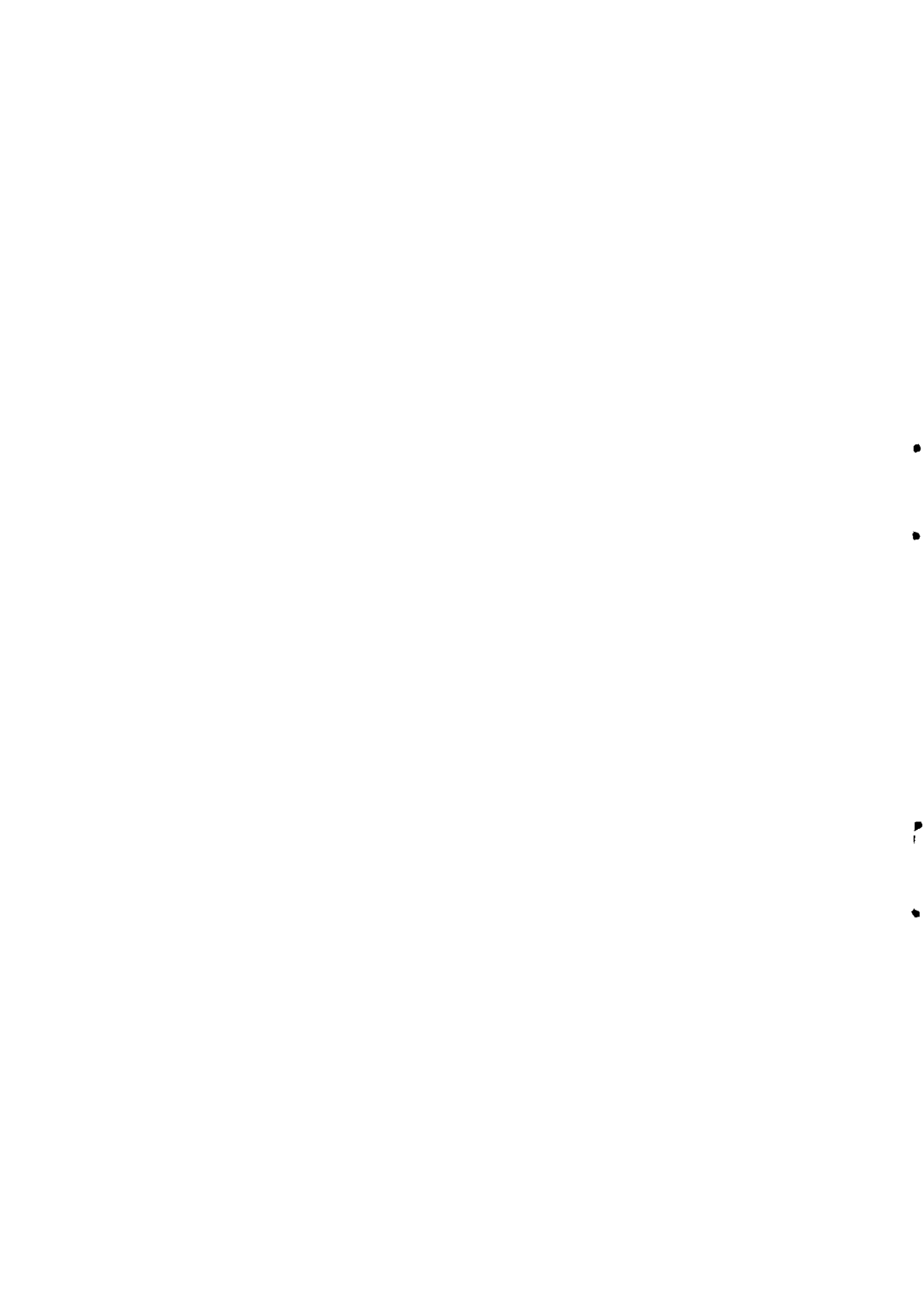
5. Экспериментально установлено, что конденсационные свойства растворов солей тетрабутиламмония бромида и иодида превосходят конденсационные свойства хорошо известного гигроскопичного вещества NaCl . Время проявления конденсационных свойств раствора соли R_1 сравнимо со временем проявления конденсационных свойств NaCl и составляет в среднем 5 с. Растворы солей тетрабутиламмония бромида и иодида можно использовать для воздействия на туманы.

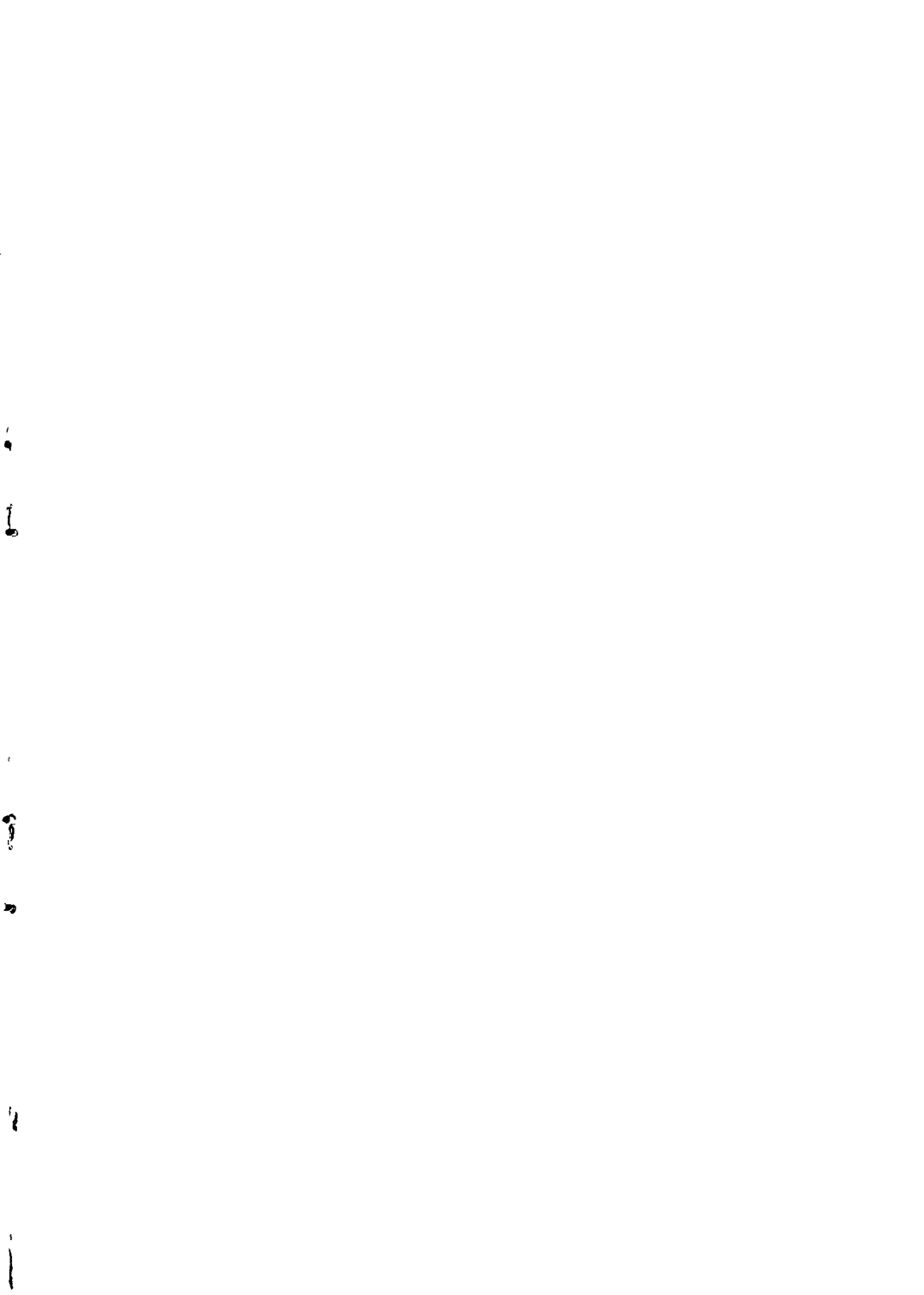
6. Разработаны и внедрены устройства для распыления жидкости в атмосфере, а также устройство для распыления жидкости под давлением. Они дают возможность регулировать количество вводимого раствора реагента, обеспечивают внесение микродоз в облачную камеру. Это позволяет проводить в дальнейшем эксперименты с большей достоверностью и с меньшими погрешностями. Получены патенты РФ.

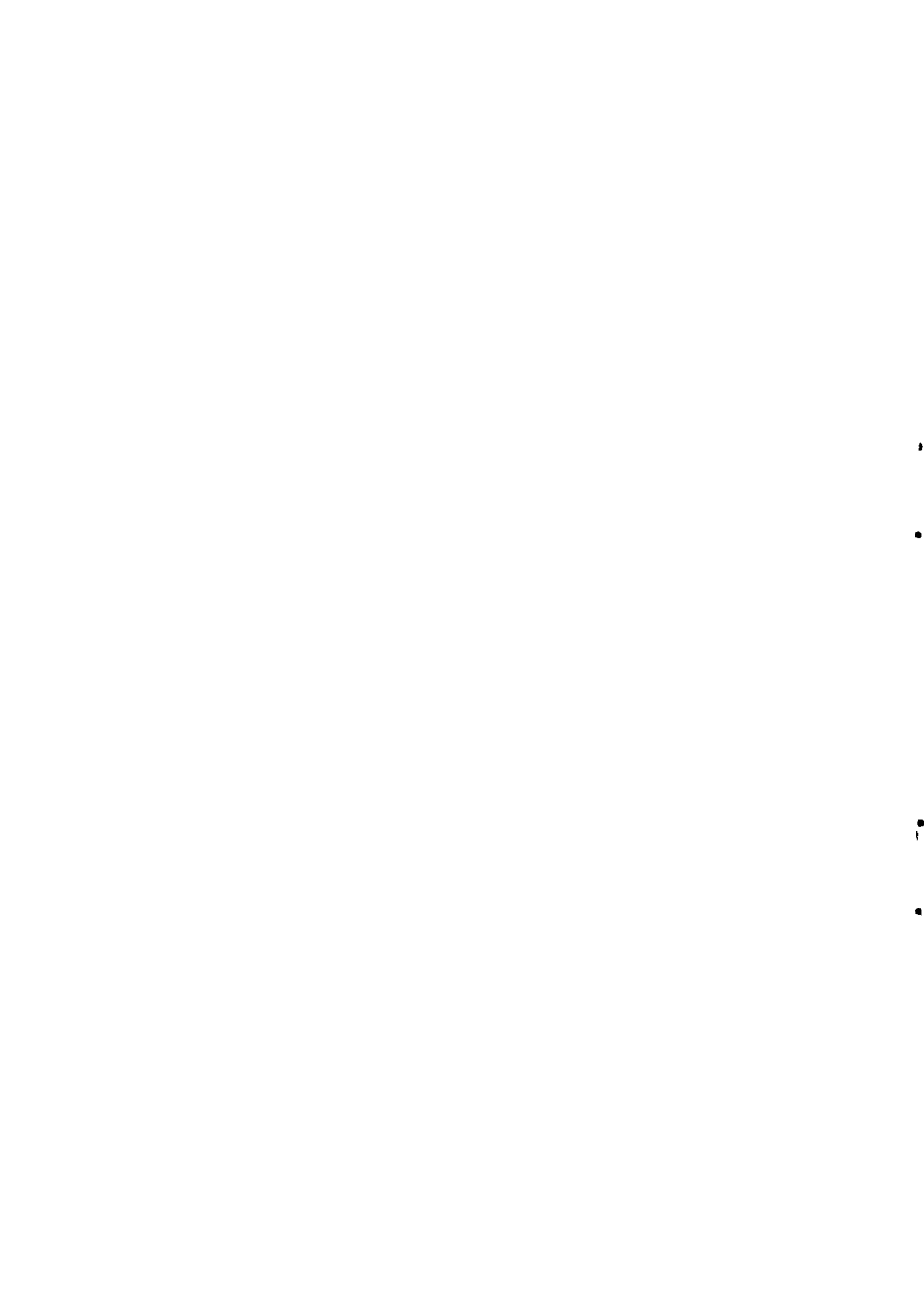
**Основные материалы диссертации опубликованы
в следующих работах**

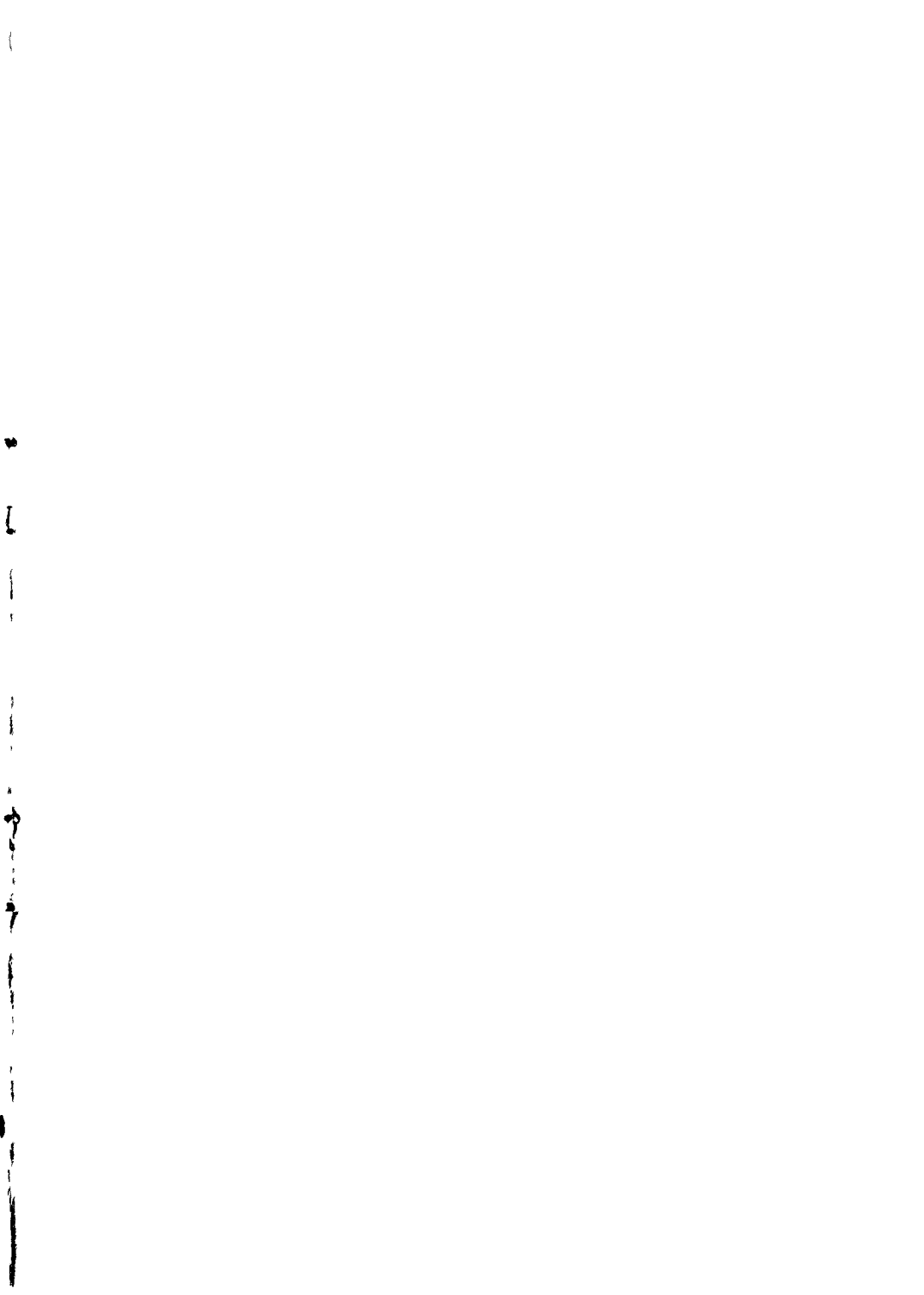
1. Байсиев Х.-М. Х., Тлисов М.И., Шогенова М.М. Устройство для распыления жидкости в атмосферу // Патент № 2228801 RU C2 7 B05B 11/00-Заявл. 29.07.2002. Опубл. 20.05.2004, Бюл. №14.
2. Байсиев Х.-М. Х., Тлисов М.И., Шогенова М.М. Устройство для распыления жидкости в атмосферу // Патент № 2228802 RU C2 7 B05B 11/00-Заявл. 29.07.2002. Опубл. 20.05.2004, Бюл. №14.
3. Комалов А.С., Степанова С.И., Шогенова М.М. Исследование льдообразующей эффективности растворов тетраалкилламмония в экологически чистом фреоне // Материалы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – Нальчик, 2001. – С. 78-79.
4. Комалов А.С., Степанова С.И., Шогенова М.М. Исследование льдообразующей эффективности тетрабутилламмония во фреоне. // Материалы региональной научной конференции по теоретическим и прикладным проблемам физики. – Ставрополь: СГУ, 2002. – С. 166-172.
5. Шогенова М.М., Исследование льдообразующей эффективности естественных аэрозольных частиц // Материалы Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Т. 2. – Нальчик. КБГУ, 2002. – С. 109-112.
6. Шогенова М.М. Исследование льдообразующих свойств частиц естественного аэрозоля // Материалы Региональной научной конференции по теоретическим и прикладным проблемам физики. – Ставрополь: СГУ, 2002. – С. 193-199.
7. Шогенова М.М. Льдообразующие и конденсационные свойства растворов солей тетрабутилламмония во фреоне // Сборник научных трудов 3 Научной конференции молодых учённых. – Нальчик: КБНЦ РАН, 2002. – С. 162-168.
8. Шогенова М.М. Зависимость концентрации естественных льдообразующих ядер разного размера от температуры и пересыщения // Сборник научных трудов 3 Научной конференции молодых учённых. – Нальчик. КБНЦ РАН, 2002. – С. 157-162.
9. Шогенова М.М. Концентрация атмосферных льдообразующих ядер в облаках и их окрестностях // Труды конференции молодых ученых Высокотгорного геофизического института, посвященной 90-летию Г.К. Сулаквелидзе. – Нальчик, 2004. – С. 14-17.
10. Шогенова М.М. Льдообразующие свойства аэрозольных частиц содержащихся в градинах // Труды конференции молодых ученых Высокотгорного геофизического института, посвященной 90-летию Г.К. Сулаквелидзе. – Нальчик, 2004. – С.17-22.

В печать 28.09.2004. Тираж 100 экз. Заказ № 4200
Типография КБГУ
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173









№18693

РНБ Русский фонд

2005-4

12739