

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации

Экз. № ____

На правах рукописи

УДК _____

**ОЦЕНИВАНИЕ РЕСУРСОВ ОБЛАЧНОСТИ
НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМ РАЙОНОМ ЕВРОПЕЙСКОЙ
ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ЗАДАЧАХ АКТИВНЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность: 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук ЕФРЕМЕНКО Александр Николаевич

Соискатель: КОЗЛОВА Наталья Александровна

г. Санкт-Петербург

2019 г.

Введение	4
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАКА И ТУМАНЫ В НАШЕЙ СТРАНЕ И ЗА РУБЕЖОМ	11
1.1. Актуальность исследования облаков и туманов и воздействия на них	11
1.2. Физические основы, методы и средства воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака...	19
1.2.1. Физические основы и методы воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака	19
1.2.2. Технические средства воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака	26
1.3. Физические основы, методы и средства воздействия на переохлажденные конвективные облака	37
1.3.1. Физические основы и методы воздействия на конвективные облака	37
1.3.2. Технические средства воздействия на конвективные облака	40
1.4. Основные направления и постановка задачи исследования	43
Выводы по 1 главе.....	44
2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАЧНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ)	47
2.1. Расслоенность облачности	48
2.2. Фазовая структура облачности.....	53
2.3. Водность и водозапас облачности.....	58
2.4. Повторяемость переохлажденных слоистых, слоисто-кучевых облаков	63
2.5. Характеристики конвективных облаков.....	64
Выводы по 2 главе.....	72
3. ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ ОБЛАЧНОСТИ К АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМ РАЙОНОМ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ	74
3.1. Оценки пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к рассеянию.....	75
3.2. Оценки пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к вызыванию осадков	77
3.3. Оценки пригодности переохлажденных слоистообразных облаков к вызыванию (интенсифицированию) осадков и рассеянию облачного покрова.....	80
3.3.1. Оценки пригодности переохлажденных слоистообразных облаков к вызыванию осадков.....	80
3.3.2. Оценки пригодности переохлажденных слоистообразных облаков к интенсифицированию осадков	82

3.3.3. Оценки пригодности переохлажденных слоистообразных облаков к рассеянию	84
3.4. Оценки пригодности переохлажденных конвективных облаков к вызыванию искусственных осадков	85
Выводы по 3 главе.....	88
4. КОМПЛЕКС МЕТОДИК ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НА ОБЛАКА РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ.....	89
4.1. Методика воздействия на переохлажденные волнистообразные облака с целью их рассеяния	89
4.2. Методика воздействия на переохлажденные волнистообразные облака с целью вызывания (интенсифицирования) осадков.....	92
4.3. Методика расчета стоимости мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков.....	95
4.4. Методики расчета количества искусственных (интенсифицированных) осадков из переохлажденных слоистообразных облаков	97
Выводы по 4 главе.....	101
5. НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАЧНОСТЬ	102
5.1. Методика подготовки и проведения мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков в интересах проведения поисково-спасательных работ	102
5.2. Оценивание качества мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков в интересах проведения поисково-спасательных работ.....	106
5.3. Техничко-экономические требования к методам и средствам воздействия на переохлажденные облака различных форм.....	118
5.4. Метод определения водозапаса волнистообразных облаков без данных о водности	122
5.5. Рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденную облачность на основе полученных данных о их характеристиках	128
5.6. Основные направления дальнейших работ в области создания методов и средств воздействия на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака	131
Выводы по 5 главе.....	134
Заключение	136
Список сокращений и условных обозначений	138
Список использованных источников	139
Приложение А	157
Приложение Б.....	158
Приложение В.....	162
Приложение Г.....	166

Введение

В последние годы в России отмечается рост на 6-7% в год опасных явлений погоды (ОЯП), нередко приводящих к гибели людей и наносящих ущерб экономике страны, оцениваемый в среднем около 1% ВВП [1]. Ежегодно в Российской Федерации отмечается 400-500 чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с ОЯП [2] (Рисунок А1 Приложения А).

Среди неблагоприятных погодных явлений особое место занимают облака, с которыми связаны такие опасные ОЯП как: град, гроза, сильные ливни, паводки, наводнения и др., наносящие большой материальный ущерб.

В связи с вышеизложенным актуальной является задача по поиску и практическому внедрению методов и средств, позволяющих устранить или в значительной мере снизить негативное влияние на деятельность человека ОЯП, связанных с облаками различных форм. В последние десятилетия для этих целей все чаще стали использоваться методы и средства воздействия на атмосферные процессы и явления, и, прежде всего, на облака и туманы.

Теоретические основы воздействия на облака и туманы были заложены в начале – первой половине XX века (1911-1940 гг.) А. Вегенером, Т. Бержероном, В. Финдайзеном, И. Лэнгмюром. В нашей стране первые лабораторные эксперименты по воздействию на облака заряженными частицами песка были проведены в 1921-1924 гг. В.И. Виткевичем. В 30-е годы проводились работы по предотвращению заморозков, гроз, рассеянию туманов и облачности. Регулярные опыты по воздействию на облака с применением в качестве реагента твердой углекислоты стали проводиться в СССР в 1948 г. Никандровым В.Я. и Чуевым Д.П.

В эти же годы Федоровым Е.К., Никандровым В.Я., Шишкиным Н.С., Качуриным Л.Г., Морачевским В.Г., Сулаквелидзе Г.К. и другими учеными в нашей стране, а также Ж. Хаугтоном, Ж. Симпсоном, В. Шефером, Б. Воннегатом, А. Деннисом и другими зарубежными учеными выполнены теоретические и экспериментальные исследования по проблеме воздействия на облака и туманы [3-6].

В советский период работы в данной области проводились в таких организациях как: Главная геофизическая обсерватория (ГГО) имени А.Ф. Воейкова, Институт прикладной геофизики (ИПГ), Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ) (ныне НПО «Тайфун»), Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО), Высокогорный геофизический институт (ВГИ), Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт (НИГМИ), Закавказский НИГМИ, Среднеазиатский НИГМИ, Казахский НИГМИ [7]. Развал СССР привел к значительному ослаблению научных и творческих связей, резкому сокращению фронта экспериментальных исследований и натурных экспериментов, а также существенному сокращению финансирования и др.

Однако с конца XX - начала XXI веков наметились определенные положительные тенденции в области воздействия на облака и туманы как в теоретическом, так и в экспериментальном плане: проведены работы по созданию благоприятных погодных условий над рядом крупных городов как в России (Москва, 1995, 1997 и т. д.), (Ставрополь, 1997), (Санкт-Петербург, 2003), (г. Казань, 2005) [8-15], так и в странах ближнего зарубежья (Ташкент, 1998, 1999, 2002 г.), (Алма-Аты, 2002, 2003 г.) [16, 17], а также и за рубежом (Сирия, 1999-2000 г.), (Иран, 1991-2001 г.), (Куба, 1987-1990 гг.), (Португалия, 1999 г.) [5, 18-22] с участием российских ученых.

Организованы и проведены в России ряд Всероссийских научных конференций по воздействию на гидрометеорологические и геофизические процессы (например, в Нальчике, ВГИ в 2001, 2002, 2007, 2008, 2011, 2014, 2017 гг., [23-30], в Санкт-Петербурге, ВКА имени А.Ф.Можайского в 2012, 2014, 2016, 2018 гг.) [31-36].

За период с 1990 по 2018 годы успешно защищены ряд докторских (Аджиев А.Х. [37], Мазуров Г.И. [38], Эжба Я.А. [39], Шаповалов А.В. [40], Калов Х.М. [44], Колосков Б.П. [42], Малкарова А.М. [43], Козлов В.Н. [44], Абшаев М.Т. [45], Шаповалов В.А. [46]) и кандидатских (Федоров О.К. [47], Корнеев В.П. [48], Геккиева С.О. [49], Мамучиев И.М. [50], Шереметьев Р.В. [51], Крюкова С.В. [52], Клейменова А.В. [53], Петрунин А.М. [54], Бычков А.А. [55], Частухин А.В. [56]), диссертаций, посвященных разным аспектам воздействия на облака и туманы (разработке технических и химических средств и методов, математическому распространению частиц химических реагентов в атмосфере и в облаках и др.).

Вместе с тем, до настоящего времени не выполнено исследований по оцениванию ресурсов облаков различных форм к воздействию с различными целями в конкретных физико-географических районах (ФГР) России. То есть налицо проблемная ситуация, заключающаяся в необходимости проведения работ по воздействию на облака различных форм в конкретных ФГР России и несовершенстве подходов в оценивании ресурсов облачности к воздействию с различными целями (вызывание (интенсифицирование) осадков, рассеяние (стабилизация) облачного покрова).

В силу вышеизложенного актуальность темы диссертационной работы определяется:

- необходимостью выявления закономерностей в распределении характеристик облаков различных форм (расслоенность, фазовая структура, водность и водозапас) в конкретных ФГР страны применительно к проблеме активных воздействий;
- необходимостью устранения (или снижения в значительной мере) негативного влияния связанных с облаками ОЯП на хозяйственную деятельность человека;
- возможностью решения широкого круга хозяйственных и экологических задач при воздействии на облака различных форм;
- необходимостью снижения ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера путем воздействия на облака различных форм в конкретном физико-географическом районе;
- необходимостью повышения качества метеорологического обеспечения хозяйственной деятельности страны за счет расширения диапазона метеорологических условий, поддающихся контролю путем воздействия на облака различных форм;
- возможностью получения экономического эффекта от внедрения в практику метеорологического обеспечения хозяйственной деятельности страны методов и средств воздействия на облака различных форм.

Исходя из этого, **цель** диссертационной работы заключается в оценивании ресурсов переохлажденной облачности^{1,2} над центральным районом Европейской территории России (ЦР ЕТР) применительно к проблеме воздействия на нее с определенной целью в интересах решения хозяйственных и экологических задач.

Для достижения поставленной цели в диссертации поставлены и решены следующие частные **задачи исследования**:

1. Выполнить анализ современного состояния исследований в области разработки методов и средств воздействия на облака различных форм.
2. Сформировать базу данных для исследования характеристик переохлажденной облачности над ЦР ЕТР применительно к проблеме воздействия на нее на основе обработки материалов самолетного зондирования атмосферы (СЗА) ТАЭ-7,7м за 1954-1964 гг. над аэропортом Внуково.
3. Выявить основные закономерности в распределении характеристик облаков различных форм (расслоенность, фазовая структура, водность и водозапас) применительно к проблеме воздействия (на примере ЦР ЕТР).
4. Получить количественные оценки пригодности переохлажденной облачности к воздействию с различными целями и рассмотреть закономерности распределения таких оценок над ЦР ЕТР.
5. Разработать комплекс методик по воздействию на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния облачного покрова для решения прикладных задач.
6. Разработать научно-обоснованные рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденную облачность в интересах решения хозяйственных и экологических задач.

В качестве **объекта исследования** в диссертации рассматриваются облака различных форм естественного происхождения.

Предметом исследования являются характеристики облаков различных форм, определяющие возможность и воздействия на них с определенной целью.

Научная задача: разработка научно-методического аппарата оценивания ресурсов переохлажденных облаков различных форм к воздействию.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

- выявлены основные закономерности в распределении характеристик волнистообразных и слоистообразных облаков (расслоенность, фазовая структура, водность и водозапас) применительно к проблеме воздействий на них на основе статистической обработки материалов СЗА над ЦР ЕТР;
- впервые получены количественные оценки пригодности к воздействию переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков, с целью вызывания искусственных и интенсифицирования

¹ В диссертации в качестве переохлажденной облачности рассматривается совокупность переохлажденных волнистообразных (только слоистых (St) и слоисто-кучевых (Sc)), слоистообразных (только слоисто-дождевых (Ns) и высоко-слоистых (As)) и конвективных (только мощно-кучевых (Cu cong.)) облаков, наблюдающихся над заданным районом.

² Ресурсность облачности к воздействию – совокупность определенных характеристик облаков различных форм в конкретном ФГР, позволяющих получать количественные оценки пригодности к воздействию с намеченной целью в интересах решения прикладных задач.

естественных осадков, а также с целью рассеяния (стабилизации) облачного покрова в интересах решения прикладных задач;

- разработан комплекс методик по воздействию на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния облачного покрова для решения прикладных задач;
- разработан метод определения водозапаса волнистообразных облаков без данных о водности для ЦР ЕТР применительно к проблеме воздействия в интересах решения хозяйственных и экологических задач.

Теоретическая значимость исследований заключается в развитии теоретических основ метеорологического обеспечения хозяйственной деятельности страны в части повышения качества за счет применения средств воздействия на облака различных форм.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- полученные в работе статистические данные о характеристиках волнистообразных и слоистообразных облаков (расслоенность, фазовая структура, водность и водозапас) могут быть использованы для уточнения моделей облачной атмосферы над Центральным районом ЕТР;
- полученные в работе количественные оценки пригодности к рассеянию волнистообразных и слоистообразных облаков и к разрушению конвективных облаков, а также оценки пригодности к вызыванию (интенсифицированию) осадков волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков позволяют, без предварительного проведения натуральных экспериментов, оценить целесообразность и необходимость проведения работ в данном районе;
- разработанные в диссертации методики по воздействию на волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака могут быть использованы для решения широкого круга хозяйственных и экологических задач (очистка воздушного бассейна мегаполиса от загрязняющих веществ, тушение (профилактика возникновения) лесных пожаров, проведение поисково-спасательных работ и др.).

Методы исследования: в работе использованы методы теории вероятностей и математической статистики, теории эффективности целенаправленных процессов, физики атмосферы и метеорологии.

Обоснованность полученных в диссертационной работе результатов исследований обусловлена всесторонним анализом предшествующих научных работ в области воздействия на облака и туманы, корректностью постановки научной задачи исследования, строгостью принятых допущений и ограничений, аргументированностью исходных положений, логической непротиворечивостью рассуждений, а также корректным использованием современного математического аппарата.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается согласованностью полученных результатов и сделанных выводов с некоторыми частными результатами других авторов, фундаментальными теоретическими положениями и имеющимся эмпирическим материалом, а также широкой апробацией на научных конференциях разного уровня и их реализацией в ряде организаций страны.

Результаты исследований **реализованы** в ВКА имени А.Ф.Можайского, в учебном процессе и двух НИР.

Имеется соответствующий акт о реализации результатов диссертационной работы соискателя.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности в распределении характеристик волнистообразных и слоистообразных облаков над ЦР ЕТР применительно к проблеме воздействия на них.
2. Оценки пригодности переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков к воздействию с целью вызывания искусственных и интенсифицирования) естественных осадков, а также к рассеянию (стабилизации) облачного покрова (на примере ЦР ЕТР).
3. Комплекс методик по воздействию на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния облачного покрова для решения прикладных задач.
4. Научно-обоснованные рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденную облачность в интересах решения хозяйственных и экологических задач.

Личный вклад автора.

Постановка научной задачи и выбор методов исследования осуществлены совместно с научным руководителем.

Личный вклад автора заключается в создании базы данных для исследования характеристик переохлажденной облачности над ЦР ЕТР применительно к проблеме воздействия на нее на основе обработки материалов СЗА (обработано 5873 подъемов самолетов-зондировщиков), а также в статистической обработке характеристик волнистообразных и слоистообразных облаков (расслоенность, фазовое состояние, водность и водозапас и др.). Соискателем разработан комплекс методик по воздействию на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака с целью вызывания (интенсифицирования) и рассеяния облачного покрова для решения прикладных задач и получены количественные оценки пригодности. Приведены научно-обоснованные рекомендации по применению методов и средств воздействия на рассматриваемые в работе формы облаков. Выполнено оценивание качества мероприятий по воздействию на переохлажденные волнистообразные облака с целью их рассеяния по показателям результативности, оперативности, ресурсоемкости и экологичности.

Кроме того, личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в проведении исследований на всех этапах работы над диссертацией и получении оригинальных теоретических и практических результатов, выносимых на защиту, в апробации результатов исследования, получивших одобрение научной общественности на 12 Международных, Всероссийских и Ведомственных конференциях, семинарах, симпозиумах, и в опубликовании результатов по выполненной работе.

Апробация работы. Различные аспекты результатов диссертационных исследований апробированы на 2 Международных и 10 Всероссийских и Ведомственных научных конференциях, семинарах, симпозиумах (Приложение А2).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 5 статьях, рекомендованных ВАК [57-61], в 25 статьях, опубликованных в различных изданиях [62-86], 2 итоговых отчетах о КНИР.

Диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология.

Объем работы. Структурно диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 225 источников, и приложения. Общий объем работы составляет 172 страницы, в том числе 56 рисунков и графиков, а также 37 таблиц.

Основное содержание работы.

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость их результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, дано краткое изложение содержания работы.

В **первой главе** диссертации проведен анализ исследований в области разработки методов и средств воздействия на облака, включающий в себя:

- актуальность исследования и воздействия на облака и туманы;
- анализ физических основ, методов и средств воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака;
- анализ физических основ, методов и средств воздействия на переохлажденные конвективные облака.

В результате проведенных исследований показана существенная зависимость деятельности хозяйственных отраслей страны от опасных явлений погоды, связанных с облаками различных форм. Это обуславливает, в свою очередь, необходимость применения перспективных методов, позволяющих устранить (либо значительно снизить) такое негативное влияние. В качестве таковых в последние годы предлагается использовать методы и средства воздействия на облака и туманы. Анализ работ в этой области позволил установить, что на современном этапе наиболее решенной является проблема воздействия на переохлажденные атмосферные облачные образования. Выполнен анализ технических средств доставки и диспергирования химических реагентов наземного и авиационного базирования для воздействия на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака.

В заключение первой главы приведены основные задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** представлены закономерности в распределении характеристик облачности на основе статистической обработки характеристик волнистообразных и слоистообразных облаков на основе анализа материалов СЗА над ЦР ЕТР (аэропорт Внуково), а именно: расслоенность, фазовая структура, водность и водозапас, а также оценки повторяемости переохлажденных волнистообразных облаков. Исследованы по материалам СЗА над выбранным районом характеристики конвективных облаков применительно к проблеме воздействия.

В **третьей главе** содержатся количественные оценки пригодности к воздействию переохлажденной облачности (переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака), с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния облачного покрова над ЦР ЕТР по месяцам и за холодное полугодие в целом (ноябрь-март).

В **четвертой главе** разработан комплекс методик по воздействию на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния облачного покрова для решения прикладных

задач. Здесь же приведена методика расчета стоимости мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков.

В **пятой** главе содержатся научно-обоснованные рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденную облачность в интересах решения хозяйственных и экологических задач, включающие в себя:

- методику планирования, подготовки и проведения мероприятий по воздействию на переохлажденные волнистообразные облака с целью рассеяния в интересах проведения поисково-спасательных работ;
- технико-экономические требования к методам и средствам воздействия на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака;
- метод определения водозапаса волнистообразных облаков без непосредственного измерения водности;
- рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденную облачность на основе полученных данных о ее характеристиках;
- направления дальнейших работ в области воздействия на переохлажденную облачность.

В заключение в виде выводов представлены основные результаты.

В приложении содержатся материалы, дополняющие основное содержание диссертации.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАКА И ТУМАНЫ В НАШЕЙ СТРАНЕ И ЗА РУБЕЖОМ

Облака и туманы играют исключительную роль не только в жизни человека, но и всего живого на земле. Появление в последние десятилетия методов и средств воздействия на такие атмосферные образования обуславливает необходимость более пристального внимания к ним. Это обстоятельство, в свою очередь, указывает также и на необходимость по новому взглянуть на вопрос, связанный с актуальностью исследования и воздействия на облака и туманы. Результаты выполненного в этом отношении исследования приведены ниже.

1.1. Актуальность исследования облаков и туманов и воздействия на них

Анализ современного состояния работ в данной предметной области позволяет сделать вывод о том, что актуальность исследования и воздействия на облака и туманы определяется следующими обстоятельствами:

Во-первых, облака оказывают серьезное влияние на радиационный и тепловой режимы атмосферы и подстилающей поверхности. Известно, что в целом на земном шаре около 60% небосвода закрыто облаками. При этом водных регионах почти весь год ясно, а в других – пасмурно, в третьих – отчетливо заметен сезонный ход количества облаков. Таким образом, количество облаков зависит от места (координат) и времени [87]. Вместе с тем анализ работ в области воздействия на облака различных форм показывает, что современные методы и средства воздействия на атмосферные и облачные процессы уже сегодня позволяют проводить такие работы на больших площадях.

Так, 11 января 1960 г. в районе Актюбинска были рассеяны волнистообразные облака на площади 11 000 км², которая через несколько часов увеличилась до 18 000 км². Это привело к понижению температуры над раскрытой территорией на 10°С по сравнению с окружающими районами и повышению атмосферного давления на 1,5-2 гПа [88].

С другой стороны, в работе [89] приводятся результаты расчетов по созданию в верхних слоях атмосферы искусственных перистых кристаллических облаков на больших площадях. По оценкам авторов этой работы, за три часа с помощью одного самолета ТУ-104 путем рассеяния в атмосфере 30 000 кг воды в виде мелких капель представляется возможным создание полей искусственных кристаллических облаков на площади порядка 100×100 км или 200×200 км. Создание кристаллической облачности на таких площадях может привести к изменению температуры воздуха в слое от поверхности Земли до слоя облаков на несколько градусов, порядка 5°С [90]. При использовании нескольких самолетов создаваемые площади искусственных перистых кристаллических облаков могут быть значительно большими. Следовательно, применение методов и средств воздействия на атмосферные процессы открывает реальные возможности для изменения количества облаков в каком-либо физико-географическом районе и, как следствие этого, для изменения в этих районах погодных условий.

Во-вторых, облака и туманы и связанные с ними ОЯП (см. рисунок 1.1 и таблицу 1.1) оказывают большое влияние на многие стороны хозяйственной деятельности человека [91].



Рисунок 1.1. Влияние облаков и туманов на хозяйственные отрасли страны

Таблица 1.1

Влияние облаков и туманов на хозяйственные отрасли экономики

№ п/п	Отрасли экономики	Виды атмосферного образования	Степень влияния атмосферного образования
1.	Гражданская авиация, США	туман, низкая облачность	Ежегодный ущерб составляет порядка 100 млн. долларов
2.	Автомобильный транспорт, США	туман, низкая облачность	Ежегодный ущерб составляет порядка 300 млн. долларов
3.	Гражданская авиация, Россия	туман, низкая облачность	18 октября – 25 октября 1987 года. Закрыты на неделю аэропорты Московской зоны и ряда других городов центральной части России. 52 тысячи пассажиров сдали билеты
4.	Гражданская авиация, Россия	туман, низкая облачность	13 марта 1993 г. закрыты все аэропорты Самарской области на срок от 6 до 12 часов
5.	Автомобильный транспорт, Россия	туман, осадки, низкая облачность	Снижение потока автомобилей на 25-50% по сравнению с потоком в ясные дни

Продолжение таблицы 1.1

№ п/п	Отрасли экономики	Виды атмосферного образования	Степень влияния атмосферного образования
6.	Железнодорожный транспорт	гололед, связанный с волнистообразными и слоистообразными облаками	Увеличиваются дополнительные затраты в объеме 1-2% от стоимости оперативных эксплуатационных расходов
7.	Автомобильный транспорт	гололед, связанный с волнистообразными и слоистообразными облаками	Число аварий на дорогах увеличивается на 25%
8.	Гражданская авиация	обледенение в волнистообразных и слоистообразных облаках	По статистике ИКАО, из-за обледенения ежегодно происходит около 7% всех авиационных катастроф, связанных с метеоусловиями
9.	Гражданская авиация	гололед, связанный с осадками из волнистообразных и слоистообразных облаков	При наличии гололеда скольжение на ВПП может быть в 2 и более раз больше, чем на бетонной полосе
10.	Морской и речной транспорт	обледенение, связанное с осадками из волнистообразных и слоистообразных облаков	Скорость отложения льда в снегопадах и переохлажденном тумане составляет для траулера, например, 0,19 и 0,22 т/ч, что приводит к опрокидыванию судна через несколько часов

Из анализа представленных на рисунке 1.1 и в таблице 1.1 данных следует, что связанные с облаками и туманами ОЯП наносят значительный материальный ущерб стране. При этом наибольший ущерб от природных явлений приходится на сельское хозяйство (рисунок 1.2) [91]. Так, например, годовой ущерб от неблагоприятных явлений погоды только на Северном Кавказе составляет порядка 200 млн. долл., в том числе [92]:

- ущерб, наносимый агропромышленному комплексу засухой, заморозками, заливанием посевов, ветром и бурей (70 млн. долл.);
- ущерб от снежных лавин и селей спортивным сооружениям и населенным пунктам в городах (около 12 млн. долл.);
- ущерб, наносимый градом, грозой, ветром, ливневыми дождями, паводками ливневого происхождения (около 50 млн. долл.);
- ущерб дорожных служб от разлива дорог, снежных и грязекаменных заносов и аэропортов и морских портов из-за задержки рейсов в случае гроз и туманов (более 50 млн. долл.).

В-третьих, облака могут приводить к возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС) различного характера, обусловленных такими связанными с облаками явлениями, как, наводнениями (например, наводнения на Дальнем Востоке в 2013 году) и пожарами (порядка 10-30% лесных пожаров может быть обусловлено воздействием молний, источником которых являются грозовые облака [93]).

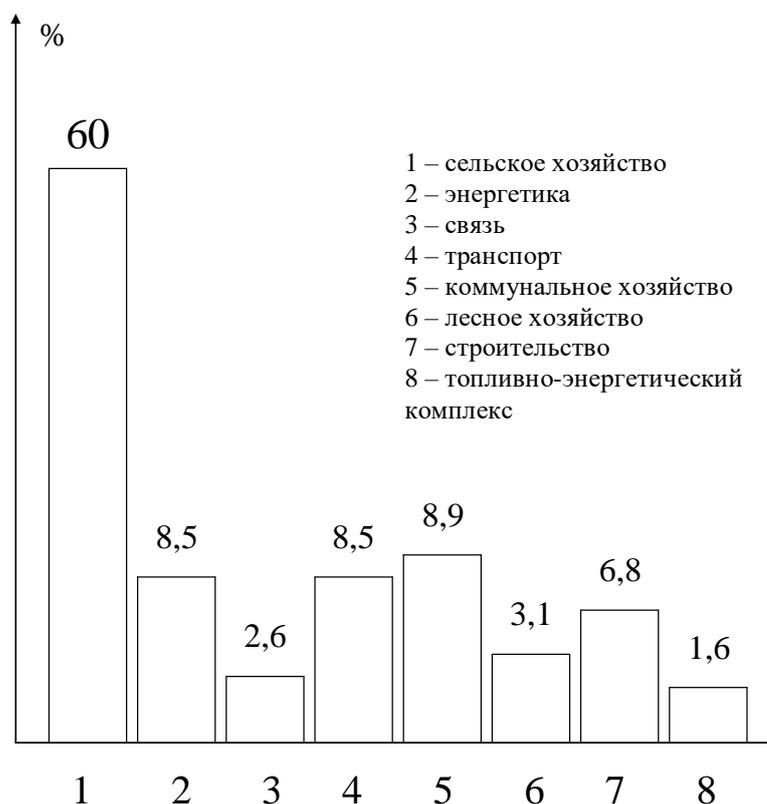


Рисунок 1.2. Ранжирование отраслей экономики с учетом понесенного ущерба от природных гидрометеорологических явлений (от общего размера ущерба по всем отраслям)

В таблице Б.1 Приложения Б приведены сведения о повторяемости ЧС, создаваемых опасными метеорологическими явлениями по крупным регионам России. Анализируя эти данные можно видеть, что например, летом на ЧС, создаваемые ливнями на разные регионы страны приходится от 27% (Европейская часть России – без Северного Кавказа) до 74% (Забайкалье и Дальний Восток). Зимой на ЧС, обусловленные обильными снегопадами, эти цифры составляют 38 и 25% соответственно.

Согласно [93], процентное соотношение между общим числом лесных пожаров (а их в России наблюдается ежегодно от 25 до 30 тысяч) и числом пожаров, вызванных грозами, значительно изменяется от года к году и от региона к региону. В отдельных регионах страны 2-3% лесных пожаров, вызванных грозами, дают до 90% всех площадей выгоревшего леса. Это обусловлено тем, что такие лесные пожары возникают в малонаселенных, труднодоступных районах и обнаруживаются на 3-4^{ый} день. В России прямые затраты на тушение лесных пожаров, вызванных грозами, составляют 10-20 млн. долларов в год [93]. Кроме экономического ущерба лесные пожары приводят к возникновению серьезных экологических проблем, перечень которых представлен на рисунке 1.3 [94-97].

Вместе с тем количество грозовых дней в ряде ФГР России может быть значительным. В качестве примера в таблице Б.2 Приложения Б приведены такие данные в течение года для Ростовской области.

Экологические проблемы, связанные с лесными пожарами

1. Лесные пожары приводят к уменьшению площади лесов. В России от лесных пожаров ежегодно гибнут леса на площади 0,8-1,0 млн. га (в иные годы площадь уничтоженных лесов достигает 1,5-2,0 млн. га).

2. Уничтожение лесных массивов приводит к уменьшению количества кислорода и увеличению углекислого газа в атмосфере.

3. В атмосферу выбрасывается огромное количество продуктов сгорания, в т.ч. с территорией, загрязненных радиацией, а также из зон скопления особо ядовитых химических веществ. Это в свою очередь приводит к загрязнению атмосферы.

4. Лесные пожары значительно ухудшают экологическую обстановку в крупных городах (например, Москва, в 2010-2011 гг.).

5. При лесных пожарах в атмосферу выделяются: аммиак от 0,5 до 12 млрд. т; оксид углерода (в пересчете на углерод) 60 млн. т; твердые аэрозоли 35-60 млн. т в год.

6. Огнетушащие вещества (в их числе и вода), растворяющие продукты горения и горючие вещества, также являются причиной загрязнения биосферы. До сих пор при тушении пожаров применяют голойдосодержащие соединения, которые, попадая в атмосферу, могут быть причиной разрушения озонового слоя.

7. По словам известного советского эколога С.С. Шварца, в настоящее время лес больше влияет на климат, чем климат на лес.

Рисунок 1.3. Перечень экологических проблем, связанных с лесными пожарами

Как следует из приведенных в таблице Б.2 данных, количество грозовых дней по Ростовской области в период с 2008 по 2011 годы изменяется в мае от 14 до 26, июне – от 14 до 22, июле – от 17 до 19, августе – от 9 до 16 и в сентябре – от 8 до 14.

Необходимо отметить, что еще в 70-е годы XX столетия в нашей стране довольно широко применялись методы воздействия на конвективные облака с целью тушения лесных пожаров [98]. В настоящее время эти методы (к сожалению забытые в период распада СССР в виду сложной экономической обстановки) начинают вновь возрождаться (но уже на новом более научном уровне) и внедряются в оперативную практику тушения лесных пожаров [95, 96, 99]. Это связано, прежде всего с тем, что в настоящее время, в соответствии с изменениями, внесенными в Лесной кодекс (Федеральный закон от 23.06.2016 г. № 218-ФЗ «О внесении изменений в лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования регулирования лесных отношений» (ст. 8.1, п. 37.1), на ФБУ «Авиалесоохрана») в рамках государственного задания возложено осуществление мероприятий по искусственному вызыванию осадков в целях тушения лесных пожаров [99].

Таким образом, одним из основных направлений деятельности 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.

В-четвертых, облака являются основным источником осадков для человека животного и растительного мира. Вместе с тем осадки распределяются по территории Земного шара крайне неравномерно. Это связано с тем, что их образование и интенсивность определяются разнообразными атмосферными и географическими условиями. Согласно [100], наиболее благоприятные условия для формирования осадков большой интенсивности создаются в районах с высокой массовой долей водяного пара и сильными восходящими движениями. К таким районам относятся экваториальные и тропические, где в среднем за год выпадает свыше 1 000 мм осадков, а местами до 12 000 мм.

Наиболее обильные осадки выпадают в восточной части Индостана, где летний муссон, дующий с моря и встречающий на своем пути предгорья Гималаев, сопровождается катастрофическими ливнями. Например, в Черапунджи, в предгорьях Гималаев, за год выпадает 23 000 мм осадков (за одни сутки 14 июня 1876 года выпало 1 040 мм осадков).

В умеренных широтах за год выпадает в среднем от 250 до 1 000 мм, в высоких широтах – менее 250 мм. Меньше всего осадков (менее 250 мм в год) выпадает в субтропической области и в пустынях умеренных широт. В таких городах, как Москва, Санкт-Петербург, Свердловск, Новосибирск, Хабаровск, выпадает в среднем 500-600 мм осадков в год [100].

Такая неравномерность в распределении осадков обуславливает острую необходимость в целом ряде стран в поиске методов, позволяющих получать дополнительное количество осадков из атмосферы, и, прежде всего, из облаков, в естественных условиях не дающих осадки. В связи с этим вот уже на протяжении нескольких десятилетий такие работы проводятся в Австралии, США, Израиле, Испании, Иране, Саудовской Аравии, Ираке и других странах [4-6, 101, 102]. Россия в этом плане также не является исключением. Работы по дополнительному увеличению осадков путем воздействия на облака различных форм в Советском Союзе проводились такими организациями как: ГГО, ЦАО, ИЭМ, ИПГ, УкрНИГМИ, САРНИГМИ, КазНИГМИ, ЗакНИГМИ [103]. Проведенными теоретическими исследованиями и натурными экспериментами было показано, что среднее увеличение количества осадков при воздействии на переохлажденные слоистообразные и волнистообразные облака в холодное полугодие может составить порядка 10-30%. При воздействии на конвективные облака в отдельных случаях количество осадков может быть увеличено до 80-100% [104]. Наибольший же эффект может отмечаться при воздействии на орографические облака. Увеличение может составить до 100% и даже более [105]. Это связано с большими значениями влажности в таких облаках (а, следовательно, и значительными величинами водозапаса), низкими высотами облаков и орографией.

Следовательно, облака могут явиться источником дополнительных осадков при применении соответствующих методов и средств воздействия на них. И это обстоятельство можно рассматривать также как одну из причин, обуславливающих необходимость исследования и воздействия на облака различных форм.

В-пятых, применение методов и средств воздействия на облака позволяет решать широкий круг хозяйственных и экологических задач. Перечни таких задач применительно к каждой из рассматриваемых в диссертации форм облаков (волнистообразных, слоистообразных, кучевообразных (конвективных) согласно их генетической классификации) приведены на рисунках Б.1 и Б.2 Приложения Б [62-67, 69, 77-81, 83, 86].

В качестве примера можно сослаться на опыт практического применения средств воздействия на облака для обеспечения благоприятных условий в Москве. Так, с 1995 г. АНО «Агентство АТТЕХ» выполнило более 50 крупномасштабных работ по улучшению погодных условий в Москве. В работах для воздействия на облака использовалось до 12 самолетов ВВС и гражданской авиации типа Ил-18, Ан-12, Ан-26, Ан-30, Ан-32, Ан-72, Ан-28, М101-Т «Гжель» и Су-30, оборудованных на время проведения работ метеорологической аппаратурой и комплексами технических средств для проведения воздействий на облака [106].

В-шестых, применение методов и средств воздействия на облака позволяет получать заметный экономический эффект. Чтобы убедиться в этом, обратимся к конкретным данным. Согласно исследованиям американских ученых, эффект по применению на ряде аэродромов США систем рассеяния переохлажденных туманов может составить в среднем величину от 1 до 10 (таблица 1.2) [91].

Таблица 1.2

Экономический эффект при использовании систем рассеяния переохлажденного тумана в ряде аэропортов США в зимний период 1989-1990 гг.

Аэропорт	Затраты, долл.	Доход, долл.	Экономический эффект	Вид тумана
Соленое озеро, шт. Утан	5800	63500	11,0	Переохлажденный
Спокейн, шт. Вашингтон	4000	28141	7,0	Переохлажденный
Медфорт, шт. Орегон	1200	14970	12,5	Переохлажденный
Бойэе, шт. Айдахо	2600	2157	0,8	Переохлажденный
Омаха, шт. Небраска	2300	2988	1,3	Переохлажденный

В отечественных научных источниках по данной проблеме также содержится немало сведений, касающихся положительного экономического эффекта проведения работ по воздействию на облака и туманы [5, 95, 96, 107-111]. Так, например, в работе [107] отмечается, что в настоящее время в РФ производственная защита сельскохозяйственных культур от градобитий осуществляется на площади 2,65 млн. га с применением автоматизированной ракетной технологией. Оценка качества проводимых противорадовых работ позволила сделать вывод о том, что ущерб на защищаемых территориях сокращается в 7,7 раза. Суммарный экономический эффект в 2016 году достиг 4,3 млрд. рублей, окупив расходы в 9,2 раза.

Следует отметить, что оценка экономического эффекта проведена без учета того, что на Северном Кавказе около 50% агропромышленной продукции дают приусадебные хозяйства. Если учесть этот факт, то окупаемость затрат увеличится в два раза.

В работе [92] указывается, что сокращение потерь Северо-Кавказского региона примерно на 50% за счет сокращения задержек рейсов и предотвращения аварий в службах дорожного, авиационного и морского движения, а также улучшения планирования сельскохозяйственных и других погодозависимых работ, оповещения об ОЯП и их предотвращения методами воздействия даст экономический эффект около 100 млн. долларов в год.

В-седьмых, актуальность исследования и воздействия на облака и туманы обуславливается также увеличением внимания со стороны государственных органов регионального и федерального значения, Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Роскомгидромета), научной общественности к вопросам, связанным с влиянием ОЯП на хозяйственную деятельность страны и разработкой средств и методов воздействия на гидрометеорологические процессы. Об этом свидетельствуют, в частности, следующие факты:

1. В соответствии с внесенными в Лесной кодекс (ФЗ от 23.06.2016 г. № 218-ФЗ, ст. 81, п. 37.1) на ФБУ «Авиалесоохрана» в рамках государственного задания возложено с 2017 года осуществление мероприятий по искусственному вызыванию осадков в целях тушения лесных пожаров. Для проведения таких работ подготовлены специалисты ФБУ «Авиалесоохрана» и получена лицензия Росгидромета на проведение работ. Подготовлены и согласованы с региональными департаментами по гидрометеорологии программы работ. Получены разрешения на проведение мероприятий по искусственному увеличению осадков. АО «ФНГИ НИИ прикладной химии» разработала новые пиротехнические изделия ПВ-26Mc пониженным классом опасности. Оборудован техническими средствами воздействия самолет АН-26 «Циклон» [99].

В результате выполнения вышеуказанных мероприятий уже летом 2017 г. стало возможным проведение работ по тушению лесных пожаров и профилактике их возникновения в период с 05.07.17 г. по 03.08.17 г. в ряде районов Республики Бурятия, Иркутской области, Забайкальского края, Республики Саха (Якутия) [99].

2. Только за последние годы рядом организаций Роскомгидромета подготовлены руководящие документы (РД) по проведению работ по воздействию на облака и туманы с целью рассеяния туманов в аэропортах и на дорогах, подавления развития конвективных облаков, регулирование погодных условий в мегаполисах, увеличения осадков из слоистообразных облаков, борьбы с лесными пожарами и др. [112-119].

3. С апреля 2014 г. многоцелевой самолет-лаборатория Як-42Д приступил к выполнению летных исследований [120-122]. Состав технических средств воздействия – 1024 пиропатрона ПВ-26 – позволяет проводить как научные исследования в области воздействий, так и производственные работы по регулированию осадков. За период с апреля по июнь 2014 г. выполнено 18 исследовательских полетов, из них – 6 полетов в работах по созданию благоприятных условий в г. Москве 9, 24 мая и 12 июня 2014 г. [106].

4. В 2014 г. Роскомгидромет получил новый отечественный доплеровский метеорологический радиолокатор (ДМРЛ-С) [123]. Данный радиолокатор может также использоваться и при проведении работ по воздействию на облака. В настоящее время полным ходом идет формирование наблюдательной сети ДМРЛ-С, создан центр сбора и обработки данных сети ДМРЛ-С.

5. 28 июня 2012 года в печати опубликовался Приказ Минприроды России № 175 «Об утверждении Административного регламента предоставления Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды государственной услуги по лицензированию работ по активному воздействию на гидрометеорологические и геофизические процессы и явления». Данный документ открывает определенные возможности для расширения работ в нашей стране в области воздействия на различные геосферы земли.

б. С начала этого столетия подготовлены и выпущены ряд монографий [5, 95, 96, 103, 124-126] и учебных пособий [91, 127, 128] по проблеме воздействия на атмосферные процессы и явления.

В-восьмых, актуальность исследования и воздействия на облака обусловлены также и тем обстоятельством, что облачность, как установлено в исследованиях по динамике атмосферы, оказывает влияние, в первую очередь, на поле движения (динамики) атмосферы, в первую очередь, на поле вертикальных движений. Вследствие этого учет облачности в численных схемах прогноза погоды повышает его оправдываемость. Более того, прогноз характеристик облаков различных форм необходим при подготовке и проведении работ по воздействию на атмосферные процессы. В случае правильного прогноза можно ожидать не только получение положительного результата воздействия на облака, но и экономии привлекаемых сил и средств. Так, например, в настоящее время успешность прогнозов АНО «Гидрометеорологическое бюро Москвы и Московской области» (создана в 1999 г.) на 48 часов вперед составляет 96-98% [106].

В-девятых, учет облаков необходим также при разработке методов долгосрочного прогноза погоды, включая и прогноз облачности. Это обстоятельство приобретает особую актуальность при долгосрочном планировании мероприятий по воздействию на облака различных форм в конкретных физико-географических районах нашей страны. Уже сегодня география работ по воздействию на облака включает в себя центральный и северо-западный районы России, а также районы Якутии, Иркутской области и др. [95, 96, 99].

Рассмотрев причины, обуславливающие актуальность исследования и воздействия на облака и туманы, перейдем к анализу физических основ методов и средств воздействия на них.

1.2. Физические основы, методы и средства воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака

Поскольку на современном этапе наиболее решенной является проблема воздействия на переохлажденные облака и туманы [4-6, 103], ниже представлены результаты исследований, связанные с анализом физических основ, методов и средств воздействия на такие виды атмосферных образований.

1.2.1. Физические основы и методы воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака

Физические основы методов воздействия на облака и туманы основываются на использовании следующих видов неустойчивости [4-6, 103]:

1. Фазовая неустойчивость облака.
2. Коллоидальная неустойчивость облака.
3. Вертикальная неустойчивость атмосферы.

Неустойчивость фазового состояния атмосферной воды открывает, пожалуй, наибольшие перспективы для создания методов и средств управления погодой, имеющих практическое значение. Именно поэтому проблема воздействия на переохлажденные облака и туманы в наши дни является наиболее значимой.

Практика работ по воздействию на облака и туманы показала, что их следует разделять на «теплые» и «переохлажденные» (или «холодные»). К переохлажденным облакам и туманам относятся атмосферные образования, содержащие переохлажденную влагу (переохлажденные капли или капли и кристаллы льда) при отрицательных температурах воздуха. Исходя из этого определения к переохлажденным облакам и туманам могут быть отнесены туманы и облака различных форм: слоистые, слоисто-кучевые, слоисто-дождевые (в ряде случаев), высококучевые.

В основе методов воздействия на переохлажденные облака и туманы (ПОТ) лежит принцип воздействия, главным образом, на неустойчивость фазового состояния воды в атмосфере. Практическая возможность искусственного изменения фазового состояния ПОТ с помощью химических реагентов была наглядно доказана В. Шефером [129] и Б. Воннегатом [130].

Из физики облаков известно, что в высоких и умеренных широтах осадки выпадают, главным образом, из облаков со смешанной фазовой структурой [131, 132]. Согласно [133], осадки из жидко-капельных облаков выпадают в 6% случаев, а из смешанных облаков – в 83%. Эти данные указывают на определяющую роль твердой фазы в образовании осадков.

Однако в облаках в естественных условиях довольно часто отмечаются нехватка или отсутствие ледяных частиц. Например, концентрация твердой фазы в облаках при температуре воздуха ниже минус 10°C меньше 10 на м^3 , а в диапазоне температур минус 5 – минус 10°C она равна всего $0,01-0,003$ л^{-1} [134]. В то же время на один кристалл приходится 10^5-10^6 облачных капель при этих значениях температуры воздуха. Следовательно, отсутствие или нехватка частиц твердой фазы в облаках является одним из условий, определяющих возможность воздействия на ПОТ путем дополнительного внесения в них искусственным образом созданных ледяных частиц.

Исследование концентрации кристаллов льда в облаках показало, что эта характеристика подвержена значительной изменчивости как во времени, так и в пространстве. Кроме этого, в облаках отмечается также и неравномерное распределение их по вертикали. Данное обстоятельство также можно отнести к фактору, способствующему осуществлению воздействия на переохлажденные облака.

Кроме необходимой концентрации ледяных частиц в облаках необходимо также и наличие условий, способствующих увеличению их размеров, то есть росту. Такими условиями (а точнее источниками влаги для дополнительных осадков при воздействии на переохлажденные облака) могут быть [135]:

во-первых, сокращение потерь облачной влаги на испарение через верхнюю границу облака за счет ее кристаллизации в результате засева химическими реагентами;

во-вторых, использование водяного пара, реализуемого за счет разности упругостей насыщенного пара над льдом и водой при внесении в облако химических реагентов, вызывающих образование в облаке дополнительных кристаллов льда;

в-третьих, дополнительное количество облачной влаги, способной выделиться при усилении восходящих потоков, вызванных выделением тепла фазовых переходов в зоне внесения химических реагентов.

Различия в упругостях насыщения над водой и льдом приводит в условиях атмосферы к важным следствиям. Пусть рядом оказались капли переохлажденной воды и кристаллы льда. Истинная упругость водяного пара в окружающем каплю воздуха в

облаках, как правило, больше упругости насыщения надо льдом и меньше упругости насыщения над водой.

По отношению ко льду водяной пар находится в пересыщенном состоянии и, следовательно, будет происходить сублимация водяного пара на кристалле льда. С другой стороны, по отношению к переохлажденной капле водяной пар находится в ненасыщенном состоянии и, следовательно, будет происходить испарение капель воды. Этот эффект перегонки воды с капли на кристаллы льда играет большую роль в образовании осадков. Наибольшая скорость перегонки и роста кристаллов льда будет наблюдаться при температурах, близких к минус 12°C [100].

Для искусственного создания ледяных кристаллов и кристаллов льда в переохлажденных облаках в настоящее время существует несколько методов. В России наибольшее распространение нашел метод, предусматривающий использование в качестве химического реагента хладореагентов. Наиболее известным веществом является твердая углекислота («сухой лед» – CO_2). Она представляет собой кристаллическую массу матово-белого цвета с температурой кипения – 78°C и плотностью $1,53 \text{ г/см}^3$.

При введении в переохлажденную часть облака или туман твердой углекислоты вблизи ее поверхности, имеющей температуру, более низкую по сравнению с температурой облака или тумана, создаются условия, при которых [3]:

- а) вследствие резкого охлаждения, у поверхности твердой CO_2 создается огромное пересыщение воздуха водяным паром, благодаря чему эти комплексы, несмотря на то, что они состоят из нескольких молекул пара, проявляются как зародыши новой фазы воды, что, при обычных условиях насыщения, не могло бы иметь места;
- б) комплексы молекул H_2O , находящихся в объеме воздуха, начиная от поверхности твердой CO_2 до изолинии в минус 40°C , обеспечиваются расположением молекул, соответствующим структуре льда. Это очень существенно, так как если бы комплексы сохранили строение воды, то они быстро бы испарились в пользу крупных капель, и процесс кристаллизации облака или тумана вообще не произошел бы;
- в) в результате такого резкого охлаждения воздуха и пересыщения его водяным паром комплексы молекул пара, получив свойства которых они уже могут, выйдя из зоны влияния твердой CO_2 , дальше расти за счет разности в упругости водяного пара над водой и надо льдом в условиях нормального насыщения в переохлажденном облаке и тумане.

В кристаллохимии выделяют два явления: самопроизвольную кристаллизацию или собственно зарождение кристаллов и внутреннюю кристаллизацию, то есть рост кристаллов уже на готовой основе.

Самостоятельное (без участия посторонних примесей) образование зародышей льда во влажном воздухе возможно лишь в условиях очень больших пересыщений (400-600%), которые в естественных условиях не наблюдаются [3, 100].

В настоящее время установлено, что комплексы молекул водяного пара, имеющие размеры, большие, чем размеры элементарной ячейки льда (частицы, состоящей из 4-5 молекул H_2O), могут при значительных пересыщениях и температурах воздуха ниже минус 40°C служить в качестве зародышей льда. Такие благоприятные условия создаются в переохлажденных водных облаках и туманах при введении в них твердой CO_2 .

За критические принимаются размеры взвешенных в воздухе ледяных частиц радиусом 10^{-7} - 10^{-6} см способных, выйдя из зоны эффективного охлаждения, дальше существовать и расти за счет разности в упругости водяного пара над водой и над льдом в условиях нормального насыщения в облаках или тумане.

Картина распространения ледяных зародышей в облаке, а также данные о количестве кристаллов льда, образующихся в результате полного испарения 1 грамма твердой углекислоты, введенной в облако по методу сброса, пути, ΔZ , который проходит сферическая частица CO_2 диаметром d до полного испарения в объеме воздуха V , охлажденного путем молекулярной теплопроводности до минус 40°C приведены на рисунке 1.4 и в таблицах 1.3-1.5 [100].

Согласно экспериментальным данным, при испарении 1 грамма CO_2 образуется, в зависимости от температуры воздуха, от $5 \cdot 10^{11}$ до $1,2 \cdot 10^{14}$ кристаллов льда.

В основе второго метода лежит введение в переохлажденные облака веществ, кристаллофизические и электрокинетические свойства которых приводят к появлению на поверхности их частиц льдоподобной структуры; последняя при условии наличия отрицательных (от минус 5°C и ниже) значений температур воздуха приводит к ледяной структуре осаждающихся на таком искусственном ядре молекул воды.

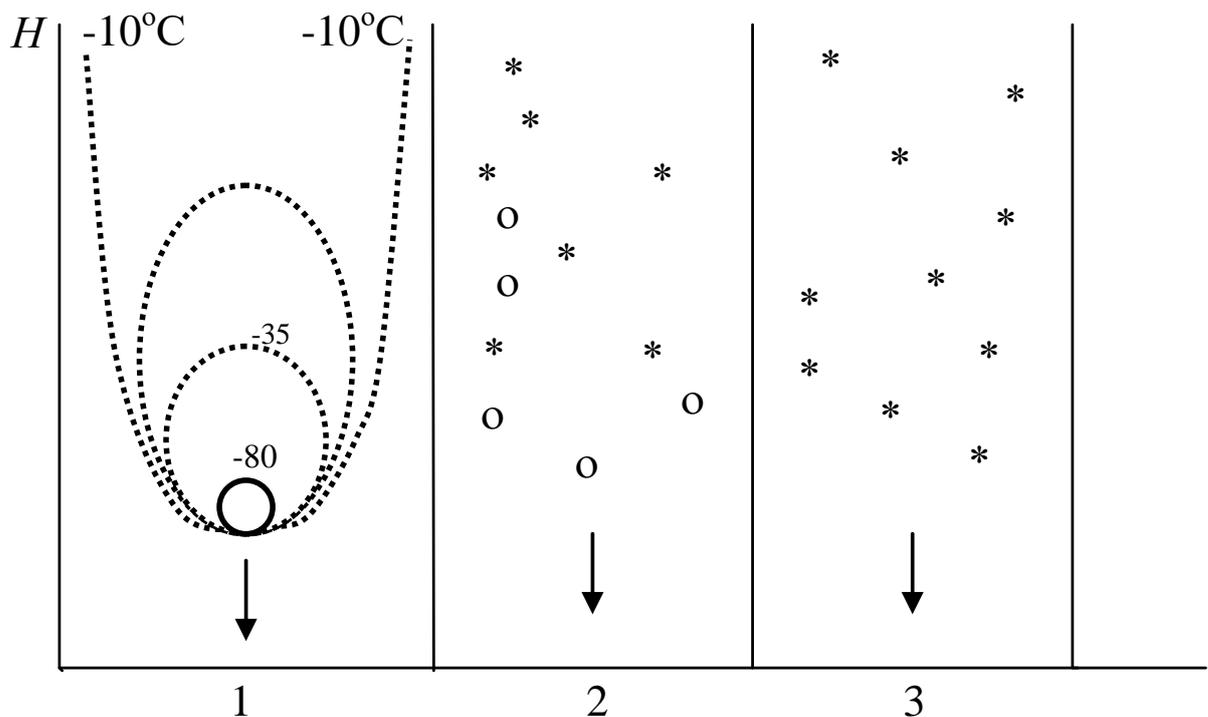


Рисунок 1.4. Картина распространения кристаллов льда в переохлажденном облаке при вводе в него гранул твердой углекислоты

Таблица 1.3

Количество кристаллов N , образующихся в результате испарения 1 г CO_2 введенной в облако по методу сброса

T°, C	минус 1	минус 5	минус 10	минус 15	минус 20
N	$5,5 \cdot 10^{11}$	$7,3 \cdot 10^{11}$	$3,4 \cdot 10^{13}$	$9,0 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{14}$

Таблица 1.4

Путь ΔZ , который проходит сферическая частица CO_2 диаметром d
до полного испарения за время t

d , см	1,0	0,4	0,2	9,1	0,04	0,02	0,01
t , с	350	127	59	26	8	3	1
ΔZ , м	4300	1130	330	8,2	10	1,6	0,3

Таблица 1.5

Объем воздуха V (см^3), охлажденного до температуры минус 40°C под влиянием
падающих частиц CO_2

d , см	Диаметр сферической частицы CO_2 , см					
	1,0	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01
V , по Л.И.Красновой	55	2,94	0,97	0,15	0,03	0,02
V , по Лэнгмюру	70	6,0	2,2	0,5	0,2	0,1
Общий объем V воздуха, охлажденного до минус 40°C за время t	1860	143	17,8	1,15	0,127	0,02

Кристаллизация одного вещества на готовой кристаллической подкладке другого проходит тем легче, чем меньше коэффициент поверхностного натяжения $\alpha_{1,2}$ «на границе раздела между подкладкой и зарождающейся фазой абсорбирующегося вещества». Если расположение молекул на подкладке такое же, как и на соприкасающейся с ней грани зародыша другого вещества, то $\alpha_{1,2} \approx 0$.

При этом условии зародыш может быть очень малым (занимать очень малую часть поверхности подставки) и может быть очень тонким (слоем в несколько молекул).

Следовательно, чем ближе структуры обоих веществ, тем лучше одно вещество размещается на грани другого.

В нашем случае рассматриваются процессы, протекающие на поверхности разделов взвешенных в воздухе твердых примесей – ядер конденсации (в широком смысле слоев) и водяного пара.

Как для образования, так и для последующего роста ледяных частиц в атмосфере особо существенным является характер расположения на ядре первого слоя (или первых слоев) молекул, извлекаемых из водяного пара. «Правило» замещения или достройки кристаллической решетки ядра абсорбированными на нем слое молекул H_2O сможет выполняться в тех случаях, когда полностью или в большинстве случаев будут соблюдаться следующие условия [3]:

- 1) должно иметься подобие между молекулами воды и ядра;
- 2) элементарные ячейки кристаллической решетки ядра и льда должны быть сходны по симметрии, а также иметь близкие размеры;
- 3) поверхностное поле должно быть однородным;
- 4) абсорбированный слой молекул H_2O на поверхности ядра должен служить двумерным кристаллом;
- 5) структура решетки ядра в процессе ее достройки должна в основном сохраниться.

При других условиях надстройки ядра абсорбированными на нем слоями молекул H_2O маловероятна, и, наоборот, можно ожидать появления хаотичного расположения абсорбированных молекул по отношению к решетки абсорбента.

Из ряда исследований известно, что при введении в увлажненный воздух при температуре несколько ниже $0^\circ C$ мельчайших частиц таких веществ, как, например, йодистое серебро, йодистый свинец и других, являющихся льдоподобными, происходит образование ледяных кристаллов, а при введении их в переохлажденный водный туман последний очень быстро кристаллизуется (см. таблицу 1.6) [3].

Таблица 1.6

Кристаллографические данные льдоподобных веществ

Вещество	Система	Постоянная решетка, $A^\circ 10^{-10}$	
Лед	Гексагональная	4,535	7,41
AgI	Гексагональная	4,535	7,49
PbI ₂	Гексагональная	4,54	8,86

Это происходит потому, что здесь условия соответствуют правилу замещения или достройки кристаллов. Строение частиц этих йодидов обеспечивает начало и дальнейшее непосредственное отложение молекул водяного пара на них, как на ядрах сублимации. В воздухе в естественных условиях упомянутые йодиды пока что не обнаружены, вероятно, вследствие их малой концентрации. Это создает благоприятные условия для их применения в качестве средств воздействия на переохлажденные капельно-жидкие облака и туманы.

В результате опытов установлено, что [3]:

1. Имеются вещества, мельчайшие частицы которых могут служить центрами образования ледяных кристаллов, то есть принимать на себя молекулы H_2O из воздуха и откладывать их в виде льда при сравнительно высоких отрицательных температурах. К таким относятся вещества, являющиеся одновременно льдоподобными и малорастворимыми в воде.
2. Замерзание переохлажденных капель при их контакте с ядрами кристаллизующих веществ зависит от свойств последних. В проведенных опытах частицы большинства тех веществ, которые оказались неспособными вызывать на себя перегонку влаги: песок, зола и соль оказались неактивными и в отношении замораживания капель.

Установлено, что кристаллизующие вещества могут инициировать образование ледяной фазы следующими путями [136, 137]:

1. Непосредственно из водяного пара путем поглощения его из окружающей атмосферы.
2. Из переохлажденной жидкой воды путем замораживания облачных капель изнутри.
3. Из переохлажденной жидкой воды путем контакта с переохлажденными облачными каплями и замораживания их на границе фаз.

Наиболее эффективной считается конкретная нуклеация, температурный порог которой около минус $3^\circ C$ [136].

В опытах по воздействию на ПОТ из кристаллизующихся реагентов наиболее широкое применение нашло йодистое серебро (AgI).

Существует четыре различных механизма гетерогенной кристаллизации ПОТ при введении в них аэрозолей AgI [136, 137]:

1. Сублимация паров воды на частицах с последующим замерзанием (необходимое условие-наличие пересыщения водяного пара по отношению к льду).
2. Конденсация водяного пара на частицах с последующим замерзанием (необходимое условие-наличие пересыщения водяного пара по отношению к воде).
3. Контактная кристаллизация (замерзание переохлажденной капли при контакте ее поверхности с частицей).
4. Объемная кристаллизация (замерзание переохлажденной капли при попадании частицы внутрь ее объема).

Третий метод воздействия на ПОТ предусматривает ведение в них химических реагентов типа пропан, фреон 11-12. Активными центрами поглощения влаги являются клатратовые соединения пропана с водой – кристаллогидраты газов. Было установлено, что температурный порог действия пропана (C_3H_8) в естественных условиях составляет порядка минус $1^{\circ}C$. Лабораторные опыты позволили сделать вывод о том, что выход активных центров от грамм жидкого пропана составляет примерно 10^{10} частиц/грамм, при этом в интервале температур от минус $10,0^{\circ}C$ до $0,5^{\circ}C$ этот выход меняется примерно на порядок [4].

Предлагаемые ранее и разработанные к настоящему времени способы и методы воздействия на ПОТ представлены на рисунке 1.5 (без их детального рассмотрения) [91] и с более полным анализом в Таблице Б3 Приложения Б.

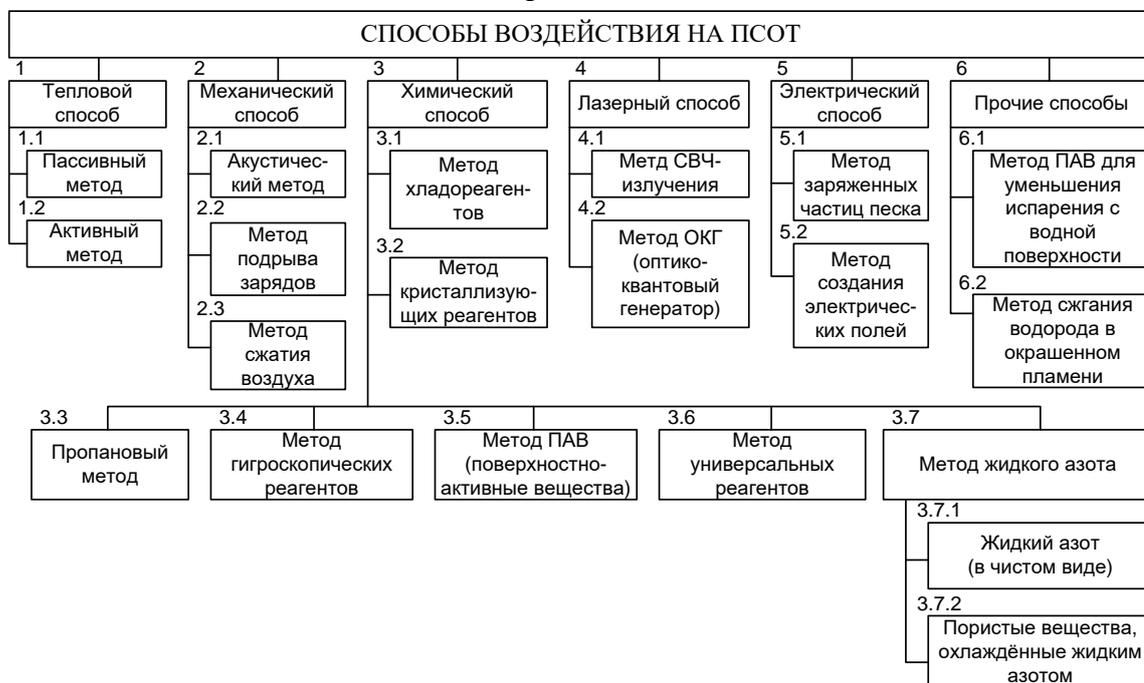


Рисунок 1.5. Способы и методы воздействия на переохлажденные слоистообразные облака и туманы

Разработка способов и методов воздействия на ПОТ обусловила, в свою очередь, необходимость разработки и способствующих технических средств для их реализации.

1.2.2. Технические средства воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака

Для практической реализации ряда разработанных к настоящему времени методов воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака (ПВОБЛ и ПСОБЛ) в нашей стране и за рубежом разработаны соответствующие средства воздействия.

Средства воздействия – это технические средства воздействия, химические средства, используемые для засева облаков (туманов), а также средства, обеспечивающие организацию подготовки, проведения мероприятий по воздействию и контролю их результатов.

Технические средства воздействия – это средства доставки и диспергирования химических реагентов (или рецептур на их основе).

Средства доставки химических реагентов – это технические средства, обеспечивающие доставку химических реагентов (или рецептур на их основе) к облакам (самолеты, вертолеты, аэростаты, беспилотные летательные аппараты и др.).

Средства диспергирования химических реагентов – это технические средства, обеспечивающие ввод и диспергирование химических реагентов (или рецептур на их основе) в облаках (генераторы аэрозолей, пиропатроны-генераторы, углекислотные установки и др.).

Химические средства – это химические реагенты (или рецептуры на их основе), осуществляющие целенаправленное изменение состояния облаков (туманов) путем их засева.

Поскольку воздействие на облака предлагается осуществлять не только с помощью авиационных средств, но и с применением наземных генераторов аэрозолей (за рубежом этот метод воздействия применяется в ряде стран [5, 138]), в настоящей работе рассмотрены технические средства воздействия обоих видов.

В качестве примера на рисунке 1.6 приведен общий вид наземного азотного генератора мелкодисперсных частиц льда (ГМЧЛ-Н) с системой наземного управления [5].

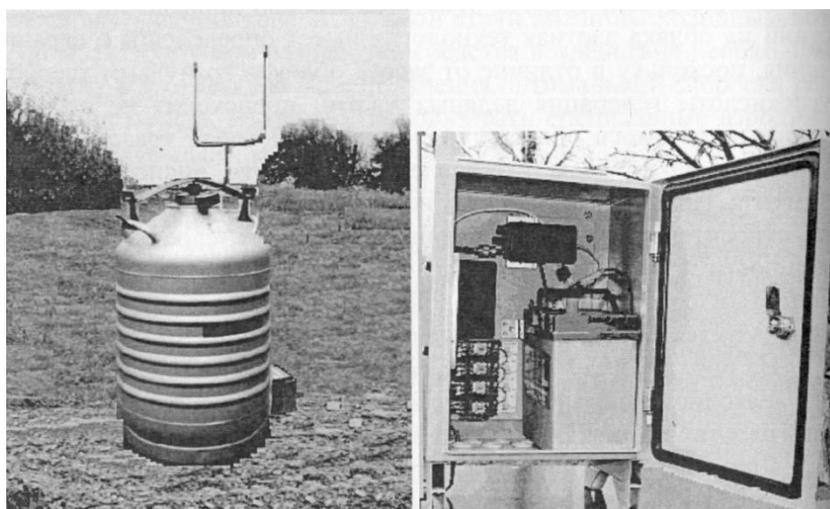


Рисунок 1.6. Наземный азотный генератор ГМЧЛ-Н (а) с системой дистанционного управления (б)

Генератор представляет собой сосуд Дьюара СК-40 объемом 40 литров и специальной насадки, которая включает в себя радиатор, трубопроводы и специальные распылители (форсунки) для диспергирования жидкого азота. Данный генератор позволяет осуществлять расход реагента в диапазоне 1,5-12 кг/г. При минимальном расходе жидкого азота непрерывная работа генератора может составлять до 20 часов.

В конце XX века в Италии (в соответствии с рекомендациями российских специалистов) были изготовлены 10 стационарных (рисунок 1.7) и одна мобильная (рисунок 1.8) жидко-азотные установки [5].



Рисунок 1.7. Общий вид стационарного жидко-азотного генератора



Рисунок 1.8. Общий вид мобильного жидко-азотного генератора

Стационарный генератор жидкого азота имел емкость 1600 л и имел возможность продолжительной (несколько суток) непрерывной работы без дозаправки. Все стационарные генераторы были установлены в Италии, на станции Venezia Est.

Мобильный генератор жидкого азота был смонтирован в кузове автомобиля и мог использоваться для воздействия на переохлажденный туман при движении. В мобильном генераторе емкость для азота объемом 175 л жидкого азота представляла собой криогенную цистерну типа TL-175 V. Генератор имеет систему автоматического поддержания давления распыления жидкого азота до 16 атмосфер. Узлы распыления

обеспечивают образование частиц льда при движении генератора. Управление работой генератора оператор осуществляет из кабины автомобиля.

Кроме жидкого азота в наземных генераторах используется диспергирование аэрозоля йодистого серебра (AgI), который получается путем сжигания ацетонового раствора реагента в специальной горелке (рисунок 1.9) или пиротехнических шашек с AgI (рисунок 1.10) [5].

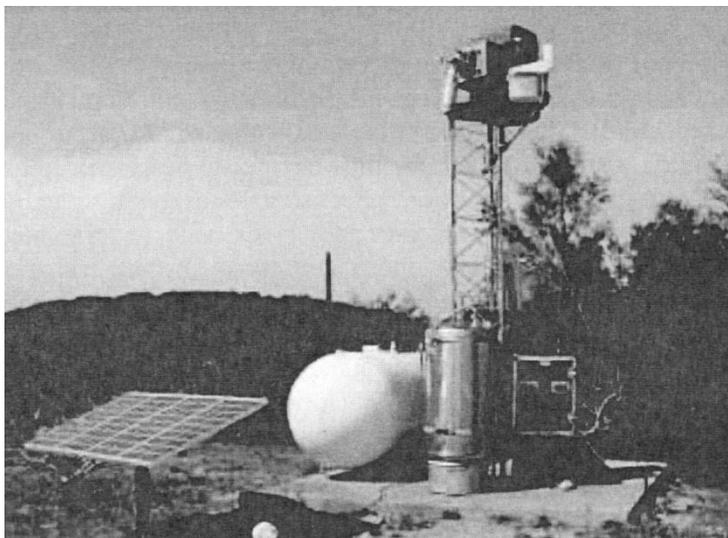


Рисунок 1.9. Жидкостный наземный генератор производства Корпорации активных воздействий (США)

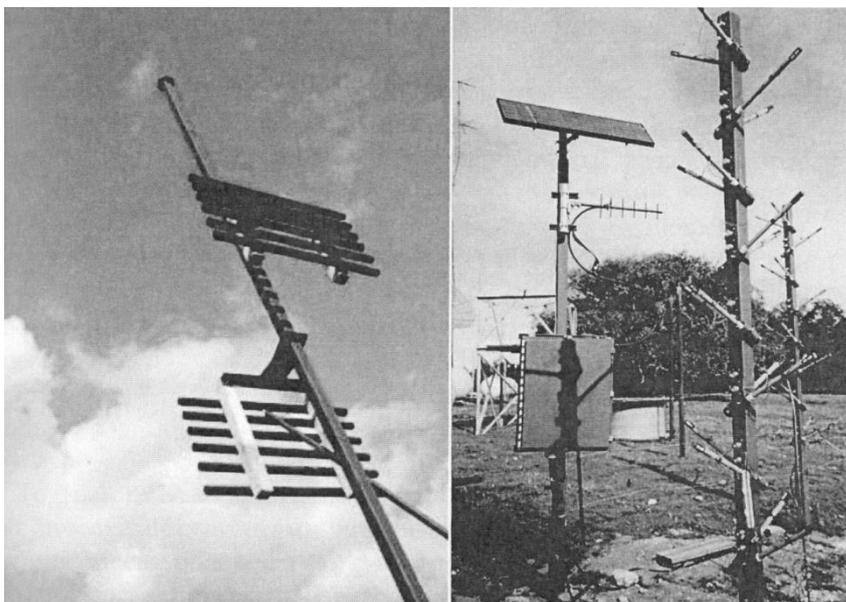


Рисунок 1.10. Наземные пиротехнические аэрозольные генераторы НАГ-07 (а) и американской компании ICE (б)

В 2005 году на базе фейерверка калибра 105 мм был разработан в серийном варианте генератор льдообразующего аэрозоля фейерверочного типа ГЛА-105 (рисунок 1.11). Характеристики этого генератора, используемого как в стационарном, так и в мобильном вариантах, приведены в таблице 1.7.

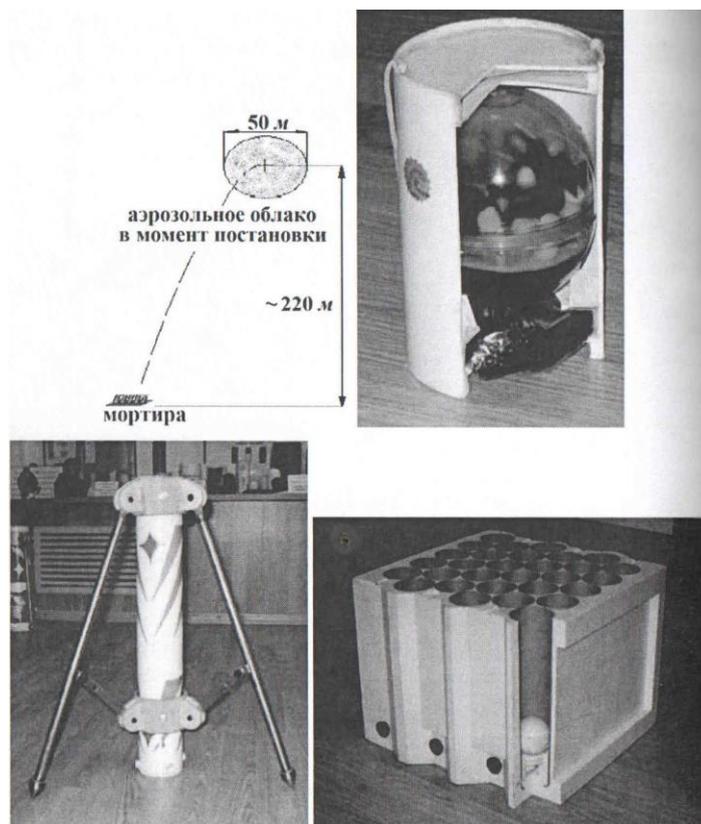


Рисунок 1.11. Генератор льдообразующего аэрозоля фейерверочного типа ГЛА-105 и пусковые установки – одноствольная и многоствольная

Таблица 1.7

Основные технические характеристики генератора ГЛА-105

Диаметр, мм	105
Высота, м	160
Масса, не более, кг	0,8
Масса льдообразующего состава, кг	0,11
Высота постановки аэрозольного облака, м	220
Количество льдообразующих ядер, не менее, при температуре:	
- минус 10°C;	$1,1 \cdot 10^{15}$
- минус 6°C	$2,4 \cdot 10^{14}$

Следует отметить, что наземные генераторы могут использоваться для различных целей. Например, во Франции и Мексике – для борьбы с градом, в Марокко, США, на Кубе – для искусственного увеличения осадков [138]. В России в последние годы такие средства предлагается применять также для воздействия на облака с целью увеличения осадков [139].

Для воздействия на облака в нашей стране и за рубежом наиболее широкое применение носит авиационные средства. Это объясняется тем, что использование самолетов позволяет осуществлять, во-первых, более точное введение химического реагента и, во-вторых, осуществлять засев облаков на больших площадях.

Основные типы российских самолетов, используемых в работах по искусственному регулированию осадков приведены на рисунке 1.12, а их основные характеристики – в таблице 1.8 [5, 101].

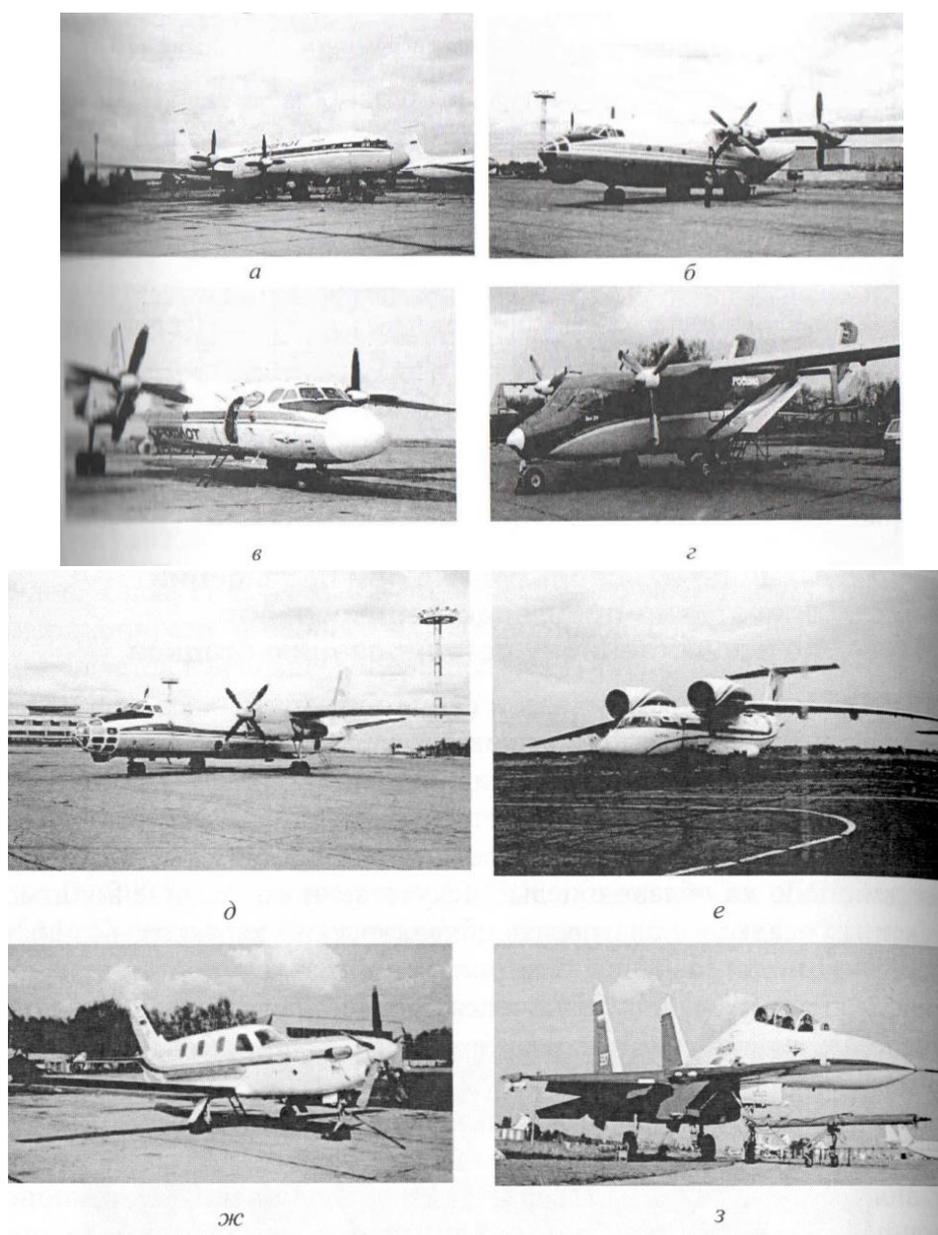


Рисунок 1.12. Самолеты, используемые в работах по активным воздействиям.

а) – Ил-18; б) – Ан-12; в) – Ан-26; г) – Ан-28; д) – Ан-30; е) – Ан-72;
 ж) – М-101Т «Гжель»; з) – Су-30

Таблица 1.8

Основные характеристики самолетов, используемых в работах по АВ

Характеристика	Ил-18	Ан-12	Ан-72	Ан-30	Ан-32	Ан-26	Ан-28	М-101Т «Гжель»	Су-30
Взлетная масса, кг	61000	61000	33000	21000	27000	24000	6500	3720	33000
Крейсерская скорость, км/ч	617	590	550	430	530	430	337	360	360-2200
Практический потолок, м	10000	9800	11800	7300	9400	7300	6000	8000	20000
Макс. дальность полета, км	4270	4560	4400	2550	2160	2340	1250	1400	3200
Макс. полезная нагрузка, кг	13500	20000	10000	5500	6700	4100	2000	630	7000

На рисунке 1.13 представлено схематичное размещение технических средств воздействия на самолеты Ан-12.

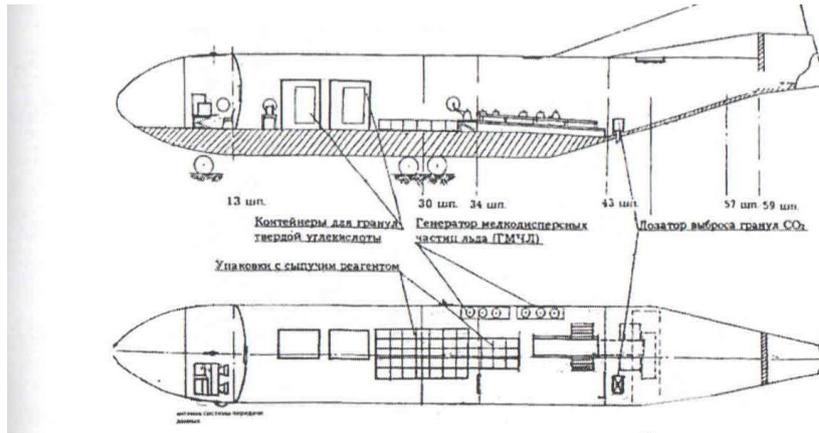


Рисунок 1.13. Схема размещения технических средств воздействия на самолетах Ан-12

В качестве средств диспергирования химических реагентов на самолетах используются установки для сброса твердой углекислоты, а также генератор жидкого азота (рисунок 1.14) и пиропатроны-генераторы на основе кристаллизующих реагентов (например, AgI) [5].

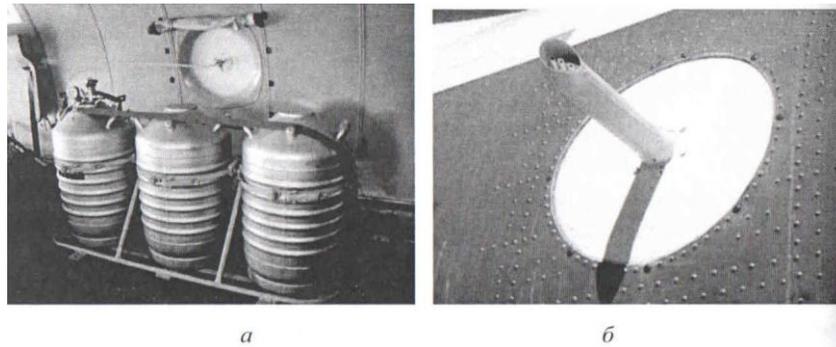


Рисунок 1.14. Самолетный азотный генератор ГМЧЛ-А, установленный на борту самолета Ан-26:

а) — общий вид; б) — распылитель

Введение аэрозоля йодистого серебра в облака осуществляется либо путем сжигания «пиротехнических шашек» с AgI (так называемых самолетных аэрозольных пиротехнических генераторов — САГов), либо путем сжигания ацетонового раствора химического реагента в специальной горелке, закрепленной на фюзеляже летательного аппарата (рисунки 1.15, 1.16) [5].



Рисунок 1.15. Самолетные пиротехнические аэрозольные генераторы, установленные на крыле самолета

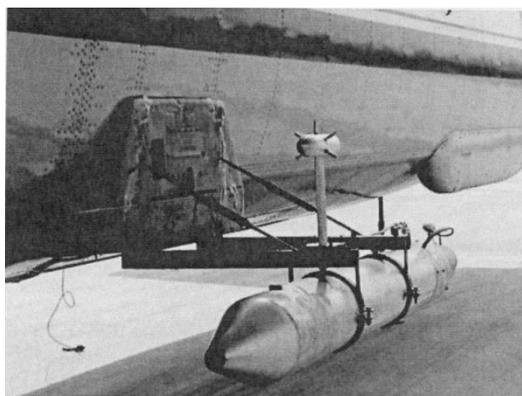
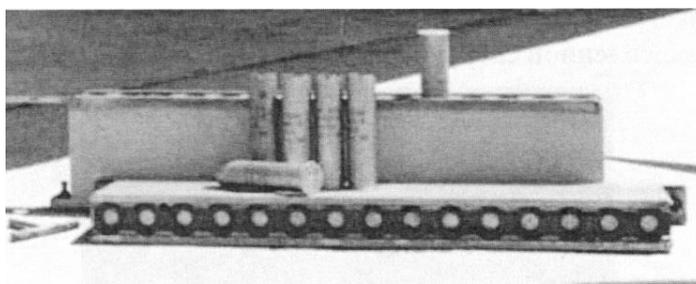
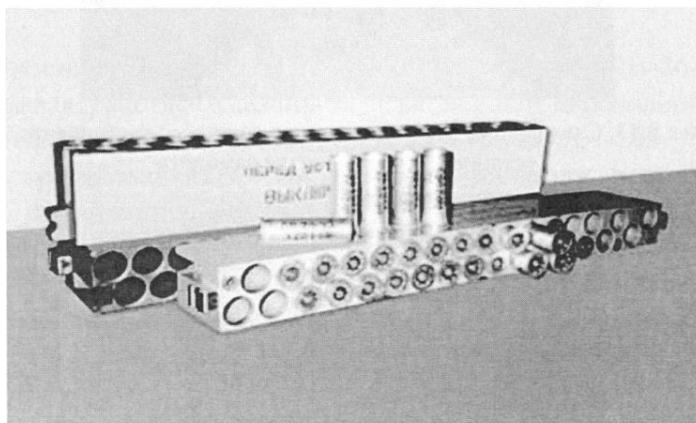


Рисунок 1.16. Горелка для сжигания ацетонового раствора льдообразующего реагента, закрепленная на фюзеляже самолета

Для засева облаков в России широкое применение нашли пиропатроны ПВ-50 диаметром 50 мм и пиропатроны ПВ-26 диаметром 26 мм (рисунок 1.17).



а



б

Рисунок 1.17. Пиропатроны ПВ-50 (а) и ПВ-26 (б)

Технические характеристики пиропатронов ПВ-50, ПВ-26-95 (с 2%-ным содержанием йодистого серебра) и ПВ-26-01 (с 8%-ным содержанием йодистого серебра) приведены в таблице 1.9.

В случае отстрела пиропатронов летательные аппараты снабжаются автоматическими устройствами (рисунок 1.18, а), емкость которого составляет 60 пиропатронов ПВ-50. Кроме него на самолеты могут устанавливаться также и устройства АСО-2И (рисунок 1.18, б) или УВ-26 (рисунок 1.18, в) с 64 и 256 пиропатронами ПВ-26 [5].

Основные характеристики пиропатронов ПВ-26 и ПВ-50

Характеристика	ПВ-26-95	ПВ-26-01	ПВ-50М
Масса пиросостава, г	33	34	320
Время горения, с	40	45	55
Содержание йодистого серебра, %	2	8	2
Длина трассы дымления, м	1000	2000	2500
Задержка начала горения, с	-	-	8
Выход льдообразующих ядер с 1 г пиросостава при температуре минус 10°С	5×10^{12}	1×10^{13}	5×10^{12}

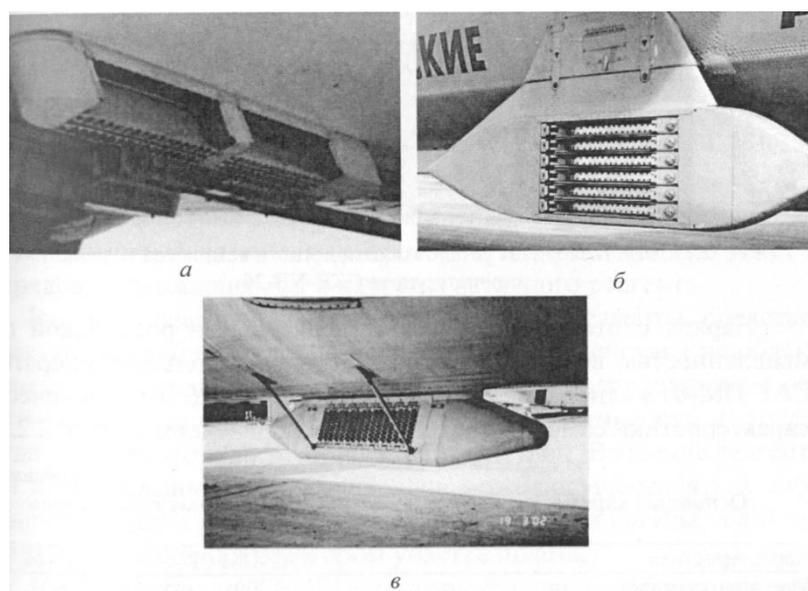


Рисунок 1.18. Самолетные устройства КДС-155 (а) для отстрела пиропатронов ПВ-50 и АСО-2И (б) и УВ-26 (в) для отстрела пиропатронов ПВ-26

Кроме указанных выше устройств, на самолете Ан-12 размещен вариант многозарядной установки для применения пиропатронов СКВ-УВ-26 (рисунок 1.19). Данное устройство позволяет обеспечить различные варианты стрельбы: одиночно, залпом по несколько пиропатронов или в виде непрерывных залпов на несколько пиропатронов с определенным интервалом.

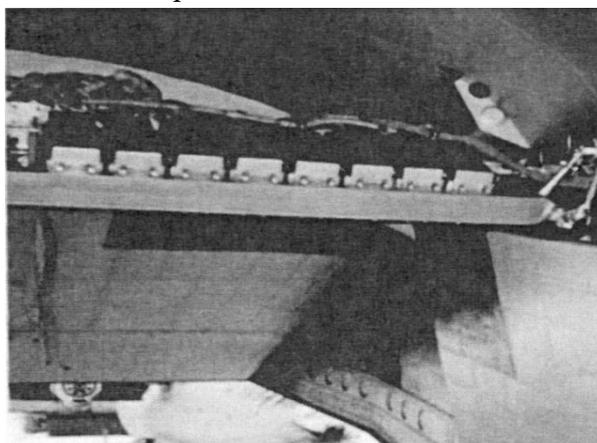


Рисунок 1.19. Многозарядная установка самолетного комплекса воздействия пиропатронами СКВ-УВ-26

Кроме отстреливаемых пиропатронов в России промышленностью изготавливаются самолетные аэрозольные генераторы САГ-ПМ-01 калибра 50 мм и САГ-26 калибра 26 мм. Технические характеристики этих генераторов даны в таблице 1.10 [5].

Таблица 1.10

Основные характеристики самолетных аэрозольных генераторов САГ-ПМ-01 и САГ-26

Характеристика	САГ-ПМ-01	САГ-26
Масса пиросостава, г	300	92±12
Время горения, с	120±20	230±30
Содержание йодистого серебра, %	8	8
Выход льдообразующих ядер с 1 г пиросостава: при температуре минус 10°С при температуре минус 6°С	не менее 10 ¹⁵ не менее 10 ¹⁴	не менее 10 ¹⁵ не менее 2×10 ¹⁴

На рисунке 1.20 представлены САГ-ПМ-01 (а) и САГ-26 (б), а на рисунке 1.20 (в) – размещение САГ-26 на самолете Ан-28 [5].

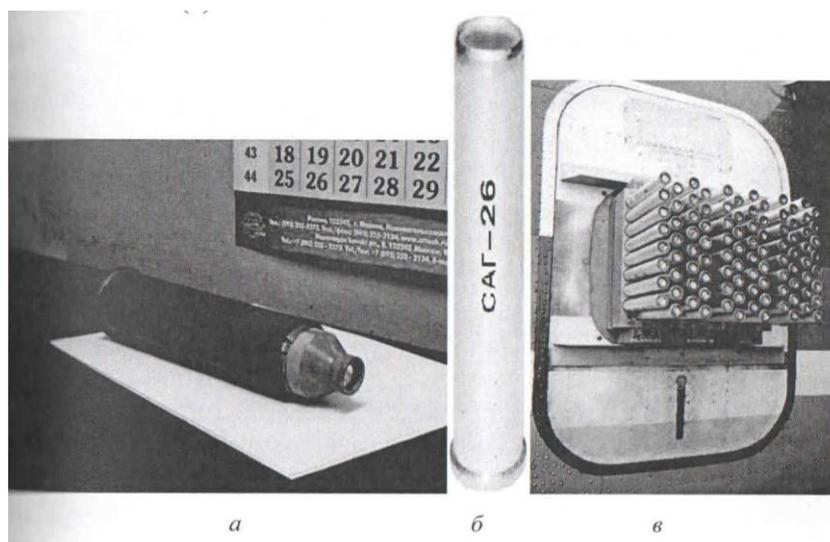


Рисунок 1.20. Самолетные аэрозольные генераторы САГ-ПМ-01 (а) и САГ-26 (б), размещение САГ-26 на самолете Ан-28 (в)

В ряде случаев для усиления эффекта воздействия засев облаков и самолетов может сопровождаться применением и наземных генераторов.

Наличие средств доставки и диспергирования химических реагентов для воздействия на облака позволило обосновать, разработать и реализовать на практике состав авиационного комплекса средств воздействия на атмосферные процессы. В результате обычный самолет превращается в специально оборудованный самолет-метеолaborаторию. В частности, такой самолет-метеолaborатория Ан-12 имеется в распоряжении Государственного унитарного предприятия «Высокогорный научно-исследовательский испытательный центр авиационной техники и вооружения (ГУП ВНИИЦ АТВ)». Он включает в себя следующие средства [140]:

- приборы для измерения температуры и относительной влажности воздуха;
- систему КДС-155 для применения пиропатронов ПВ-50;

- дозатор-гранулятор твердой углекислоты АДГ-1;
- термостатированный контейнер для хранения 1 тонны твердой углекислоты;
- систему для сброса грубодисперсных порошков, в частности, цемента;
- генератор для диспергирования жидкого азота ГМУЛ-С-400 для получения мелкодисперсных частиц льда;
- аппаратуру спутниковой навигации GPS;
- средства обмена информацией с командным пунктом (ручного и автоматического);
- средства сбора информации (измерительные датчики и GPS подключены к бортовой ЭВМ). Специальные датчики фиксируют моменты времени применения пиропатронов, грубодисперсных порошков, ГМУЛ-С-40 и АДГ-1 и записывают их в ЭВМ;
- средства управления воздействием – метеорадиолокатор МРЛ-5, подсистему ввода-вывода информации, подсистему обмена данными с самолетами-метеолабораториями, а также подсистему хранения, анализа и представления информации.

Все данные, связанные с маршрутом полета самолета, информацией о параметрах аппаратуры и результатах воздействия, отображаются на наземной ЭВМ.

Имея в наличии сведения о бортовой информации и радиолокационные данные, руководитель работ принимает дальнейшие решения, касающиеся проведения работ по воздействию на облака.

В 2016 году АНО «Агентство АТТЕХ» с целью повышения качества управления работами по активному воздействию (АВ) был создан «мобильный комплекс АВ» [141], включающий в себя [142, 143]:

- малогабаритный метеорологический радиолокатор (ММРЛ) «Контур-Метео-01» с системой цифровой обработки и регистрации информации;
- систему для обеспечения взаимодействия и канал приема-передачи данных между оперативным центром и самолетами, осуществляющие засев облаков;
- оперативный центр (ОЦ) управления работами по воздействию на базе мобильного пункта управления (МПУ), включающий подсистемы оперативной обработки и архивирования данных;
- легкий летательный аппарат (ЛА) со средствами воздействия и бортовым комплектом системы приема-передачи информации.

Разработанный мобильный комплекс приведен на рисунке 1.21. В качестве легких ЛА, указанных на рисунке 1.21, предлагается использовать беспилотные ЛА, оборудованные соответствующими средствами воздействия на облака [144].

Общий вид ММРЛ «Контур-метео-01» показан на рисунке 1.22.

Данный ММРЛ позволяет обнаруживать конвективные облака на расстоянии до 150-200 км, а слоистые облака – до 100-120 км. Он может быть использован для получения радиолокационной метеорологической информации в интересах проведения работ по искусственному регулированию осадков (ИРО) в составе как стационарных, так и мобильных пунктов управления воздействиями на облака.

Кроме перечисленных выше средств управления работами по воздействию на облака в АНО «Агентство АТТЕХ» создан мобильный пункт управления работами по активному воздействию на облака (МПУ АВ) (рисунок 1.23) [101, 143].

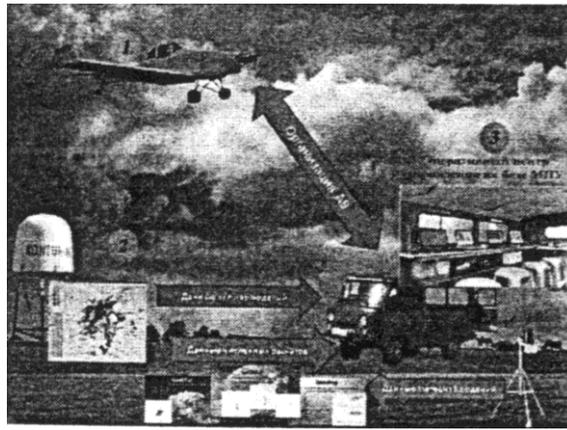


Рисунок 1.21. Мобильный комплекс АВ:

1 – легкий летательный аппарат, оборудованный средствами воздействия; 2 – ММРЛ «Контур-метео-01»; 3 – ОЦ управления работами по АВ на базе МПУ

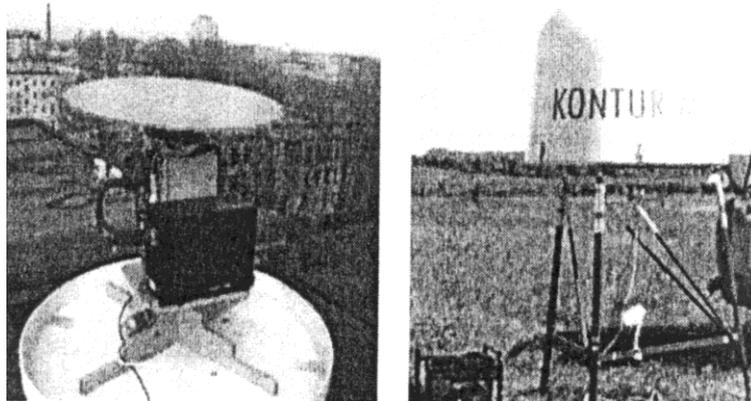


Рисунок 1.22. Общий вид ММРЛ «Контур-метео-01»



а)



б)

Рисунок 1.23. Общий вид МПУ АВ (а) на базе автомобиля УАЗ 3909, оперативный пункт управления (б) в кабине автомобиля УАЗ 3909

Он включает в себя [143]:

- оперативный пункт управления воздействиями на облака на базе автомобиля УАЗ 3909 (ОП МПУ АВ);
- программно-аппаратный комплекс МПУ АВ;
- комплексы системы автономного энергоснабжения и вспомогательных средств технического обеспечения;
- оперативный пункт управления (рабочие места для операторов в салоне автомобиля УАЗ 3909, коммутационно связанных с ММРЛ и программно-аппаратным комплексом (ПАК МПУ)).

Созданные к настоящему времени технические средства воздействия на облака и туманы позволяют решать широкий спектр прикладных задач с целью искусственного увеличения (регулирования) осадков в интересах сельского хозяйства, в борьбе с лесными пожарами, для метеозащиты мегаполисов от аномальных явлений погоды и последствий техногенных катастроф [145].

1.3. Физические основы, методы и средства воздействия на переохлажденные конвективные облака

Согласно [146], конвективные облака – это облака вертикального развития, имеющие вид изолированных (иногда объединенных в гряды) облачных масс, вертикальные размеры которых одного порядка с горизонтальными. Эти облака заключаются в нижнем ярусе (в умеренных широтах – ниже 2000 м), но нередко их верхние части находятся в среднем и верхнем ярусах. К ним относятся кучевые и кучево-дождевые облака.

В метеорологическом словаре дается также и определение облаков конвекции, т. е. облаков, связанных с атмосферной конвекцией. В первой стадии развития конвекции, когда она является лишь разновидностью неупорядоченного турбулентного движения, это плоские кучевые облака (Cu), кучевые средние (Cu med), а также разорвано-кучевые (Cu fr). При возникновении хорошо оформленных восходящих токов значительной скорости возникают мощные кучевые облака (Cu cong) и кучево-дождевые облака (Cb), иногда называемые грозовыми и градовыми.

С учетом целесообразности и необходимости проведения мероприятий по воздействию наибольший интерес представляют облака Cu cong и Cb (грозовые и грозовые). Вместе с тем, в ряде случаев возникает необходимость также и в проведении воздействий на облака Cu, Cu hum и Cu med, например, с целью их разрушения или, напротив, усиления их роста.

Исходя из этого, представляется интересным рассмотреть физические основы, методы и средства воздействия на все перечисленные выше формы воды и разновидности конвективных облаков. Результаты выполненного в этом направлении исследования приведены ниже.

1.3.1. Физические основы и методы воздействия на конвективные облака

Физические основы методов воздействия на конвективные облака (КОБЛ), исходя из условий их образования и эволюции, базируются на использовании коллоидальной и фазовой неустойчивостей облаков, а также на вертикальной неустойчивости атмосферы. Это связано с тем, что КОБЛ могут быть как теплыми, так и переохлажденными [100].

Обобщенный перечень способов и методов воздействия на КОБЛ представлен на рисунке 1.24 [4, 5, 91, 103, 147-150].

Анализ данных, приведенных на рисунке 1.24, позволяет прийти к следующим заключениям:

во-первых, тепловой и лазерный способы, включающие в себя методы с использованием тепла от различных источников, а также лазеров и источников СВЧ-нагрева воздуха, могут применяться в основном для воздействия на кучевые облака и облака Cu hum с целью либо усиления их роста (метод 1.1), либо с целью рассеяния облаков (методы 4.1 и 4.2);

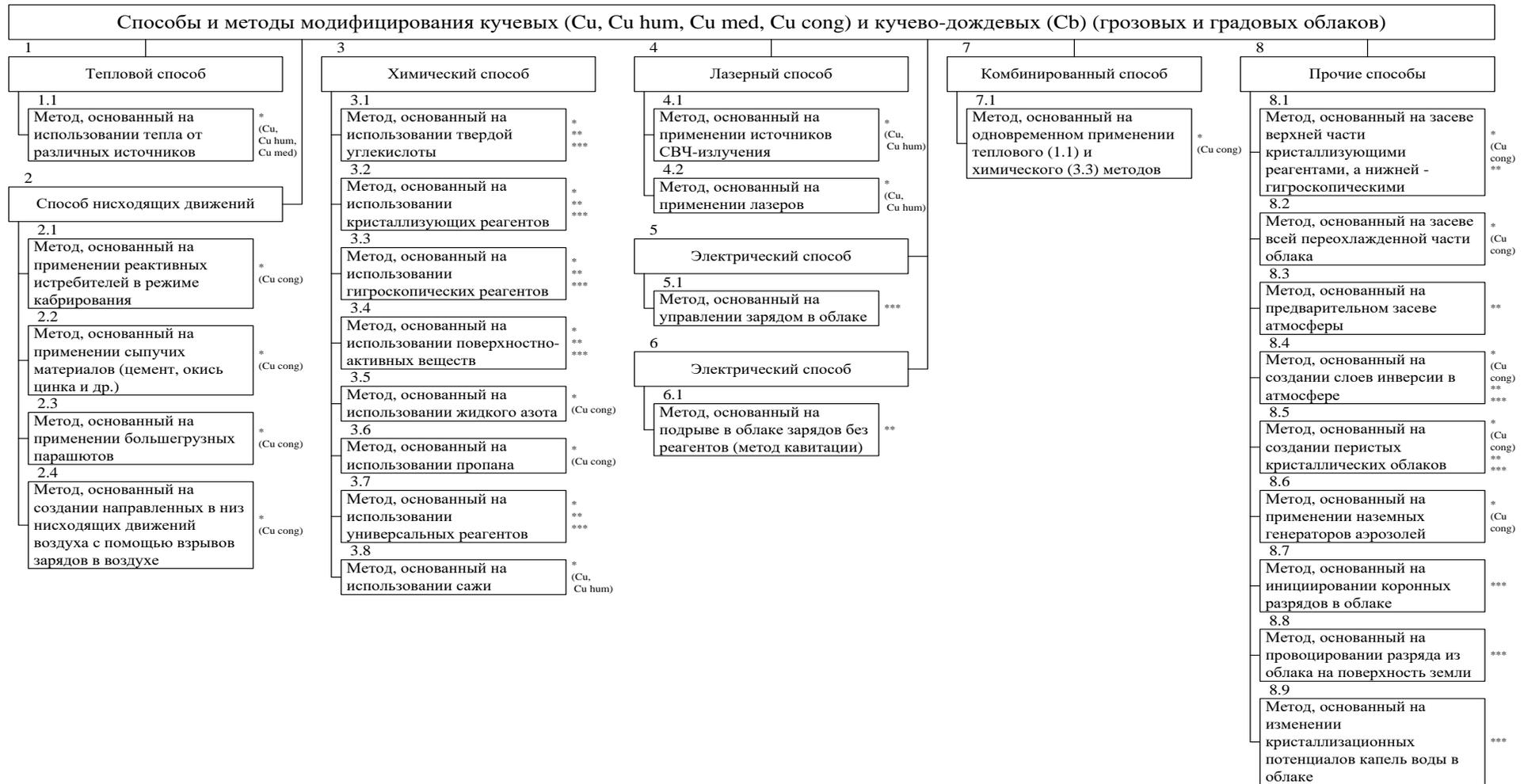


Рисунок 1.24. Методы воздействия кучевых (*), градовых (**), и грозовых (***) облаков

во-вторых, способ нисходящих движений, использующий методы 2.1-2.4, предназначен в основном для разрушения КОБЛ. Наибольшее применение в настоящее время нашел метод создания нисходящих потоков воздуха путем сброса грубодисперсных порошков (в частности, цемента). Применение такого метода позволяет осуществлять разрушение КОБЛ мощностью до 4-5 км в течение 15-20 минут;

в-третьих, химический способ предполагает использование различных химических реагентов (в нашей стране, главным образом, твердой углекислоты, жидкого азота, йодистого серебра, цемента) для воздействия на конвективные облака различных разновидностей (кучевые, градовые, грозовые);

в-четвертых, методы воздействия на КОБЛ с помощью наземных генераторов аэрозолей (в частности, йодистого серебра) и предварительного засева атмосферы (8.6 и 8.3) вряд ли могут найти практическое применение ввиду большого расхода реагента и малой вероятностью попадания его в облака;

в-пятых, электрический способ основан на управлении зарядом в облака путем генерирования искусственных зарядов с помощью длинного горизонтального провода, на который подается потенциал. Провод тянется за самолетом, летящим под облаками, а транспортировка ионов в облако осуществляется восходящими потоками воздуха;

в-шестых, инициирование коронных разрядов (метод 8.7) в облаке осуществляется за счет доставки тонких металлических нитей, которые электрическое поле в сотни-тысячи раз, усиливая его вблизи острых концов. Если при этом потенциал поля превышает критическую величину, достаточную для начала коронного разряда, то вблизи концов каждой иглы образуются объемные заряды противоположного знака. Создаваемый нитями ток между объемными облачными зарядами ослабляет напряженность электрического поля и удаляет облака от состояния грозового разряда. Выполненные натурные эксперименты показали, что после засева грозового облака дипольными отражателями (длина – несколько см, толщина – доли мкм) через 10-15 минут наблюдается снижения молниевой активности;

в-седьмых, в основе всех существующих и разрабатываемых методов провоцирования (интенсифицирования) молниевых разрядов (метод 8.8) лежит принцип, заключающийся в создании условий, достаточный для возникновения и развития лидара. Это достигается введением в поле электрического объемного заряда удлинённого проводника;

в-восьмых, перспективными методами воздействия на грозовые и градовые облака могут считаться методы, заключающиеся в создании перистых кристаллических облаков с помощью химических реагентов и задерживающих слоев в атмосфере с помощью сажи. Эти методы (8.4 и 8.5) исключают возможность развития кучевых облаков до стадии градовых и грозовых;

в-девятых, в качестве перспективного метода рассматривается также метод, заключающийся в одновременном засеве верхней части облака кристаллизующими реагентами, а нижней части – гигроскопическими. Данный метод был апробирован в ряде случаев на практике и показал положительные результаты;

в-десятых, динамический метод засева облаков (8.2), заключающийся в засеве всей переохлажденной части облака кристаллообразующими реагентами, может быть применен в основном в тропиках. Цель использования этого метода – увеличение мощности КОБЛ с целью получения дополнительных осадков. Метод требует большого расхода химических реагентов.

Методы кавитации (6.1) и метод изменения потенциала облачных капель (например, путем внесения в облако соляной кислоты) могут (при определенных условиях) найти применение на практике.

Разработаны к настоящему времени способы и методы воздействия на КОБЛ с целью их практического применения обуславливают необходимость создания соответствующих технических средств.

1.3.2. Технические средства воздействия на конвективные облака

Поскольку в диссертационной работе предполагается провести оценивание потенциала переохлажденных конвективных облаков применительно к центральному району ЕТР, то, основываясь на анализе экспериментальных работ последних 10-20 лет по воздействию на переохлажденные облака различных форм в этой части РФ, можно с большой долей объективности предположить, что основными объектами воздействия в теплое полугодие будут являться облака *Cu cong.* Воздействие на такие облака осуществлялись, главным образом, с целью либо изменения места выпадения искусственных осадков в интересах обеспечения приведены в Москве праздничных и спортивно-массовых мероприятий, либо с целью их разрушения с целью недопущения перерастания их в облака кучево-дождевые.

С учетом этого обстоятельства представляется целесообразно в рамках данной диссертации остановиться только лишь на тех авиационных средствах воздействия на КОБЛ, которые применялись ранее и используются в настоящее время. Подробные сведения о современных технических средствах воздействия на градовые и грозовые облака приведены в работах [2, 107].

Авиационные средства воздействия на конвективные облака

Для воздействия на конвективные облака могут быть использованы авиационные средства, применяемые для воздействия на переохлажденные волнистообразные облака (см. п. 1.2.1 диссертации).

В качестве реагента в работах по подавлению развития конвективных облаков и зон затопленной конвекции используется грубодисперсный порошкообразный реагент. Исследования показали, что эффективность действия порошкообразного реагента существенно зависит от состава порошка, его гидрофильности, удельного веса и дисперсности. Очень грубый или слишком тонкий помол приводят к снижению эффективности действия реагента. Оптимальная дисперсность порошка (суммарная поверхность всех частиц единицы его веса), обеспечивающая наиболее высокую степень увлечения падающим аэрозольным облаком окружающего воздуха и облачной массы, составляет примерно $3000 \text{ см}^2/\text{г}$. Этому значению дисперсности соответствует средний размер частиц, примерно около 5 мкм. Наиболее полно указанным свойствам соответствует обычный строительный цемент, состоящий из природным глиноземов с 4%-ой добавкой гипса. Кроме цемента, в качестве реагентов могут использоваться также диатомит, бентонит, белая глина, окись меди, песок с дисперсностью около $3000 \text{ см}^2/\text{г}$. Наиболее полно указанным выше свойствам соответствует строительный цемент марки 500 [5].

Для порционного введения порошкообразного реагента в облака используются упаковки с принудительным вскрытием, которые сбрасываются с самолета с помощью рольганговых и ленточных транспортеров или специальных с помощью ручных приспособлений (см. рисунок 1.25) [5, 103].

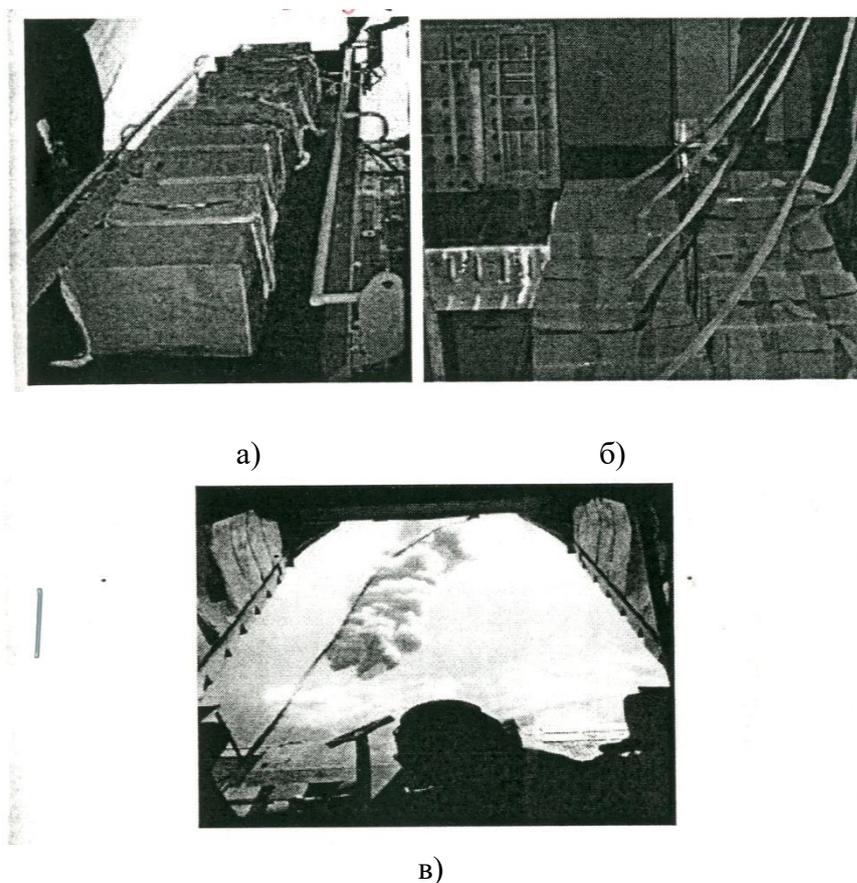


Рисунок 1.25. Транспортер с упаковками на самолете Ан-12 (а), упаковки, подготовленные для ручного сброса с самолета Ил-18 (б), ручной сброс упаковок с самолета Ан-72 (в)

Масса сбрасываемых упаковок с грубодисперсным порошком составляет 25-30 кг. Конструкция упаковки предусматривает ее принудительное раскрытие после сброса с борта самолета. При раскрытии упаковки ее корпус разделяется на небольшие элементы, безопасные как для наземных объектов, так и для воздушных судов. Следует отметить, что в последнее время из большой инерционности имеющихся транспортеров сброс упаковок осуществляется в основном операторами вручную.

На многих самолетах воздействия, таких как Ан-12, Ан-26 установлены системы видеорегистрации сброса порошкообразных реагентов. Система видеорегистрации позволяет вести видеозапись процесса сброса и раскрытия упаковок на протяжении всего полета.

В 2006 г. Агентством АТТЕХ совместно с ЛИИ имени М.М.Громов были успешно проведены испытания сброса порошкообразных реагентов самолета Су-30 с использованием штатных контейнеров КМГУ-2 (рисунок 1.26) [103].

С целью повышения качества работ по воздействию на облака (включая и КОБЛ), проводимых с помощью авиационных средств предлагается использовать авиационный комплекс, представленный на рисунке 1.27 и защищенный патентом [151].

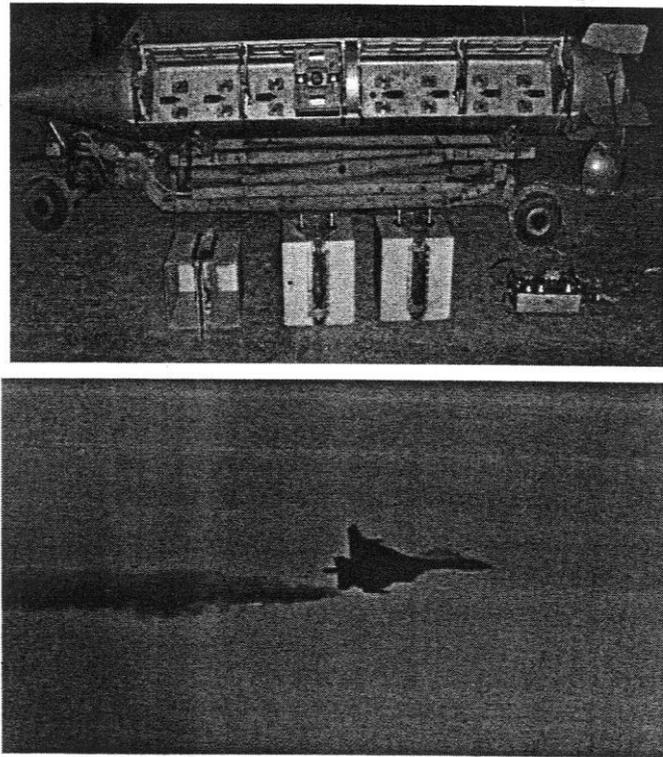


Рисунок 1.26. Контейнеры КМГУ-2 для сброса с упаковкой с порошкообразным реагентом массой 14 кг и сброс упаковок с самолета Су-30



Рисунок 1.27. Авиационный метеорологический комплекс для активных воздействий на облака

Вместе с тем следует отметить, что в последние годы в качестве средств доставки химических реагентов в волнистообразные и конвективные облака предлагается использовать легкомоторные самолеты и беспилотные летательные аппараты [141, 144]. Например, самолеты Ан-2 в 70-е годы XX столетия применялись в работах по тушению лесных пожаров в качестве средства доставки химических реагентов в облако путем их диспергирования под основание конвективных облаков [98].

Наличие химических и технических средств воздействия на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака обуславливает необходимость проведения исследований, связанных с оцениванием ресурсов всей переохлажденной облачности, наблюдающейся в пределах центрального района ЕТР и в течение всего года. Отсутствие к настоящему времени выполненных в этом направлении работ делают тему диссертации актуальной и своевременной.

1.4. Основные направления и постановка задачи исследования

Основные результаты, полученные в настоящей работе в области воздействия на облака и туманы, можно охарактеризовать следующим образом:

1. Сформулированы в теоретическом плане основы образования осадков в переохлажденных (Венегер А., Берджерон Т., Финдайзен В.) и теплых (Лэнгмюр) (период 1911-1940 гг.). Труды этих авторов стали в дальнейшем фундаментом для разработки развития теоретических основ воздействия на облака и туманы. Большой теоретический вклад в этом направлении внесли такие советские ученые, как: Федоров К.Е., Залиханов М.Ч., Шишкин Н.С., Качурин Л.Г., Морачевский А.А., Вульфсон Н.И. из зарубежных ученых следует назвать Мейсона В., Денниса В и др.

2. Сформулирован принцип управления атмосферными процессами, в частности, процессами в облаках и туманах, автором которого является академик Федоров Е.К. «Установленная изменчивость в крупных метеорологических и гидрологических процессах большой длительности, их взаимодействие друг с другом и весьма вероятная неустойчивость, а также непрерывно возрастающая все более высокими темпами энергетическая мощь человеческого общества позволяют надеяться, что удастся отыскать в комплексе климатообразующих факторов подходящие каналы управления, доступные нашему управлению» – писал Федоров Е.К. [152]. Такими каналами в атмосфере и облаках являются состояния неустойчивости.

3. Шефером В. в 1946 г. [129] и Воннегатом В. в 1947 г. [130] запатентованы твердая углекислота (CO_2) и йодистое серебро (AgI) – химические реагенты для воздействия на переохлажденные облака и туманы. Открытие этих реагентов стало серьезным толчком как к началу и развитию экспериментальных работ, так и поиску и разработке новых химических реагентов.

4. В период с 1946 г. по настоящее время в нашей стране и за рубежом разработано большое количество методов воздействия на переохлажденные и теплые облака и туманы. Применительно к переохлажденным облачным образованиям такие методы приведены в развернутом виде в таблице Б.3 приложения Б.

5. Для практических разработанных методов воздействия в нашей стране и за рубежом созданы определенные технические средства. В нашей стране большой вклад в разработку технических средств воздействия, в частности, на переохлажденные облака и

туманы внесли Корнеев В.П. [48], Федоров О.К. [47], Серегин Ю.Л. и Гайворонский И.И. [153], Абшаев М.Т. [2, 107] и др.

6. В результате проведения большого количества экспериментов на экспериментальном метеорологическом полигоне Украинского НИГМИ в 60-70-х годах XX века получены критерии пригодности переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и кучевообразных облаков к воздействию с целью вызывания (интенсифицирования) искусственных осадков и рассеяния облаков. В этом плане целесообразно назвать работы Леонова М.П. и Перелета Т.И. [154], Половина И.П. [155, 156], Прихотько Г.Ф. [157] и др.

7. Получены некоторые оценки пригодности к рассеянию облаков различных форм в ряде районов страны. Здесь необходимо отметить, что работы таких ученых, как: Воскресенского А.И. [158], Беляева В.И. [159], Александрова Э.Л. [160], Вяльцева В.В. [161].

8. Для воздействия на переохлажденные облака и туманы с целью их рассеяния, а также вызывания искусственных осадков в нашей стране разработаны соответствующие методики, освещенные в ряде работ [95, 96, 155, 156, 162, 163].

Вместе с тем в научной литературе по проблеме воздействия на облака и туманы не приводятся работы, связанные с:

- выявлением закономерностей в распределении характеристик (расслоенность, фазовая структура, водность и водозапас) волнистообразных и слоистообразных облаков в конкретных ФГР страны;
- получением количественных оценок пригодности волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков к воздействию с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния (стабилизации) облачного покрова в конкретных ФГР страны;
- обоснованием хозяйственных и экологических задач, решаемых при воздействии на облака определенных форм;
- оцениванием ресурсов облаков различных форм применительно к проблеме АВ в конкретных физико-географических районах;
- разработкой методик воздействия на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния облачного покрова;
- разработкой тактико-технических требований к методам и средствам воздействия на облака и туманы;
- разработкой рекомендаций по практическому применению методов и средств воздействия на облака и туманы, в частности на переохлажденные;
- оцениванием качества мероприятий по воздействию на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака.

Решению этих вопросов, приведенных выше и не решенных до сих пор в области воздействия на облака и туманы, и посвящена настоящая диссертационная работа.

Выводы по 1 главе

Проведен анализ исследований в области разработки методов и средств воздействия на облака и туманы, включающий в себя:

- актуальность исследования и воздействия на облака и туманы. Показано, что она обусловлена: во-первых, существенным влиянием облаков и связанных с ними опасных явлений погоды (низкая облачность, плохая видимость, сильные осадки в виде дождя и снега, град и др.) на функционирование многих хозяйственных отраслей страны; во-вторых, возникновением чрезвычайных ситуаций различного характера (наводнения, пожары, снежные заносы и др.), связанных с облаками; в-третьих, необходимостью перераспределения осадков в ряде районов страны; в-четвертых, увеличением внимания со стороны государственных органов регионального и федерального значения, Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Роскомгидромета), научной общественности к вопросам, связанным с влиянием ОЯП на хозяйственную деятельность страны и разработанных средств и методов воздействия на гидрометеорологические процессы; в-пятых, возможностью получения заметного экономического эффекта и решения широкого круга хозяйственных и экологических задач и др.;

- анализ физических основ, методов и средств воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака. Показано, что в основе методов воздействия на переохлажденные облака и туманы лежит принцип, главным образом, на неустойчивость фазового состояния воды в атмосфере. Рассмотрен механизм действия таких реагентов как твердая углекислота, йодистое серебро, жидкий пропан. Приведена классификация способов и методов предлагаемых ранее и разработанных к настоящему времени способов, и методов воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака. Показано, что на современном этапе наиболее широкое применение находит химический способ воздействия на переохлажденные облака, основанный на использовании различных химических реагентов. Рассмотрены наземные (азотный генератор ГМЧЛ-Н, стационарный и мобильный жидко-азотный генератор, пиротехнические аэрозольные генераторы НАГ-07, генератор льдообразующего аэрозоля фейерверочного типа ГЛА-105 и пусковые установки) и авиационные (самолетный азотный генератор ГМЧЛ-А, пиротехнические аэрозольные генераторы, установленные на крыле самолета, горелки для сжигания ацетонового раствора льдообразующего реагента, пиропатроны ПВ-50, самолетные установки КДС-155, установка для воздействия пиропатронами СКВ-УВ-26, самолетные аэрозольные генераторы САК-ПМ-01). Основными типами самолетов на борту которых устанавливаются перечисленные выше средства диспергирования химических реагентов являются: АН-12, АН-26, АН-28, АН-30, АН-72, М-101Т «Гжель»;

- анализ физических основ, методов и средств воздействия на переохлажденные конвективные облака. Показано, что физические основы методов воздействия на конвективные облака, исходя из условий их образования и эволюции, базируются на использовании коллоидальной и фазовой неустойчивостей облаков, а также на вертикальной неустойчивости атмосферы. Это связано с тем, что конвективные облака могут быть как полностью теплыми, так и полностью переохлажденными, либо теплыми в нижней, а переохлажденными в верхней частях облака. Приведена классификация способов и методов воздействия кучевых, грозовых и градовых облаков. Установлено, что на современном этапе для воздействия на переохлажденные конвективные облака (также как и на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака) применяется в основном химический способ, основанный на применении химических реагентов. Технические средства воздействия на конвективные облака с помощью химических

реагентов, в основном те же, что и при воздействии на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака. Для порционного сброса порошкообразного реагента в конвективные облака для их разрушения используются транспортеры на которые устанавливаются упаковки с цементом (самолеты АН-12, АН-26, АН-72 и др.). В последние годы успешно проведены испытания сброса порошкообразных реагентов с самолета Су-30 с использованием штатных контейнеров КМГУ-2.

Определены основные направления и осуществлена постановка задачи исследования.

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАЧНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ)

Одной из важных задач исследования в области воздействия на облачность является задача, связанная с исследованием закономерностей распределения характеристик облаков различных форм (расслоенность, фазовая структура, водность и водозапас и др.) на основе статистической обработки и оцениванием их ресурсов к воздействию в конкретных ФГР страны. К настоящему времени в литературе имеется обширная библиография, посвященная исследованию фазовой структуры [154-156, 164-167], расслоенности [168-172], водности и водозапасов [173-178] облаков. Сведения о перечисленных выше характеристиках облаков, необходимых для планирования, подготовки и проведения мероприятий по воздействию на них, приводятся также в ряде фундаментальных справочников [87, 179] и мероприятий [100, 170, 171] в области физики облаков.

Однако, критический анализ этих публикаций показывает, что полученные в них сведения о характеристиках облаков относятся в основном к районам Украины, Казахстана, Западной Сибири, Средней Азии. Более того, в ряде случаев указанные данные относятся либо к большим по площади районам (например, вся территория бывшего СССР), либо охватывает значительные периоды времени (год, сезон). Все это обуславливает необходимость более детального и комплексного изучения характеристик облачности над центральным районом ЕТР применительно к проблеме воздействия.

Основным исходным материалом для исследования закономерностей распределения характеристик волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков над центральным районом ЕТР явились протоколы сетевого самолетного зондирования атмосферы (СЗА) ТАЭ-7,7м над аэродромом Внуково за 1953-1964 гг. Всего проанализировано около 6000 (5873) подъемов самолетов-зондировщиков. Привлечение материалов СЗА объясняется тем, что достаточно надежные данные о пространственной структуре облаков и их характеристиках можно получить в настоящее время лишь с помощью специально оборудованных самолетов-лабораторий [120-122, 170].

Исследования ряда авторов [180-182] о пространственно-временной изменчивости полей облаков, в частности волнистообразных и слоистообразных, свойственна пространственная взаимосвязь, особенно четко выраженная в холодное полугодие. По данным [181, 183], изотропность поля изокоррелят сохраняется зимой до 600 км, летом – до 400-500 км. Кроме того, исследование временной устойчивости состояний облачности показало, что вероятность сохранения сплошной облачности в течение 24 часов зимой составляет 0,75 [180].

Следовательно, можно сделать вывод о том, что характеристики облачности, в частности волнистообразной и слоистообразной, полученные для одного пункта, могут характеризовать ее на значительной территории (десятки – сотни тысяч км²). Таким образом, можно полагать, что данные СЗА, полученные в пункте зондирования (аэропорт Внуково) могут быть использованы для исследования характеристик облачности над центральным районом ЕТР.

Более подробно характеристика исходного материала и методика его обработки приведены в Приложении В.1.

Результаты по вопросу исследования закономерностей распределения характеристик волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков над ЦР ЕТР приведены ниже. Поскольку в настоящее время наиболее разработанными и практически внедренными являются методы и средства воздействия на переохлажденные облака и туманы, в настоящей работе характеристики волнистообразных и слоистообразных облаков рассмотрены применительно к месяцам холодного полугодия, а именно – начиная с ноября и заканчивая мартом. Выбор этого периода года обусловлен тем, что именно в эти месяцы над рассматриваемым районом наблюдаются устойчивые отрицательные значения температуры воздуха.

2.1. Расслоенность облачности

Расслоенность облачных систем является одной из важных характеристик их вертикальной структуры, необходимой для решения различного рода научных и практических задач. Особую важность эти данные приобретают при проведении работ по воздействию на облака. Так, они необходимы для оценки количества дополнительных осадков, разработки методик засева облаков и оцениванию возможности рассеяния (стабилизации) облачного покрова.

В таблице 2.1 и на рисунке 2.1 приведены результаты исследования расслоенности ВОБЛ над центральным районом ЕТР. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод относительно закономерностей распределения расслоенности ВОБЛ. Одна из них наглядно свидетельствует о том, что в течение зимы и холодного полугодия преобладают однослойные облака, повторяемость которых составляет 66-76%. Наиболее часто такие облака встречаются в феврале (76,4%). Это, по-видимому, связано с тем, что волнистообразные облака (слоистые, слоисто-кучевые) чаще всего являются, как справедливо отмечено в [100], подынверсионными.

Таблица 2.1

Повторяемость (%) расслоенности ВОБЛ (без Ас) (с осадками и без осадков)

Месяц	Число облачных слоев				Число зондирований
	один	два	три	четыре	
ноябрь	66,2	28,7	4,8	0,3	334
декабрь	68,8	29,4	1,8	-	381
январь	68,7	28,0	3,3	-	336
февраль	76,4	20,5	3,1	-	224
март	70,2	24,3	4,5	1,0	198

На повторяемость двухслойных ВОБЛ в рассматриваемый период приходится чуть менее трети случаев. При этом в течение всех пяти месяцев значения повторяемостей таких облаков находятся в пределах 20,5-29,4%, что также можно отнести к выявленной для рассматриваемого района закономерности в расслоенности ВОБЛ.

Закономерно также, что трехслойные, как и четырехслойные ВОБЛ, встречаются довольно редко. На долю первых приходится 2-5% случаев, а на долю вторых – не более 1%.

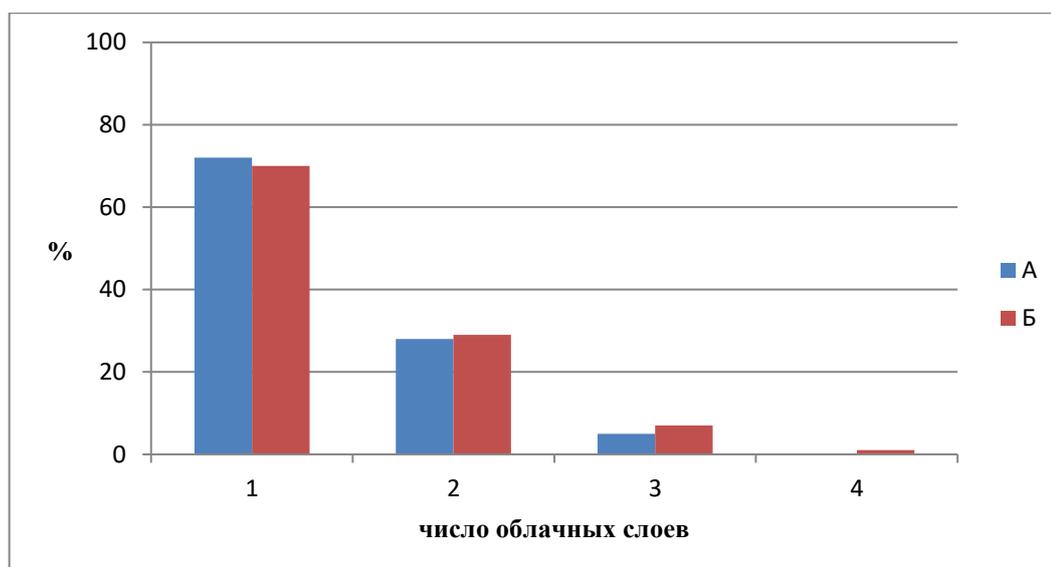


Рисунок 2.1. Повторяемость ВОБЛ (без Ас) (с осадками и без осадков) для зимы (А) и холодного полугодия (Б)

Приведенные выше данные характеризуют ВОБЛ без разделения их на осадконесущие и без осадков. Вместе с тем, при проведении работ по засеву облаков с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния облачного покрова важно иметь данные о повторяемости обоих типов облаков (с осадками и без осадков). Такие сведения представлены в таблице 2.2 и на рисунках 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2

Повторяемость (%) расслоенности ВОБЛ (без Ас)

Месяц	Число облачных слоев				Число зондирований
	один	два	три	четыре	
ноябрь	<u>58,8</u>	<u>34,0</u>	<u>6,2</u>	<u>1,0</u>	<u>97</u>
	69,2	26,6	4,2	-	237
декабрь	<u>71,4</u>	<u>25,9</u>	<u>2,7</u>	<u>-</u>	<u>147</u>
	67,1	31,6	1,3	-	234
январь	<u>61,1</u>	<u>36,4</u>	<u>2,5</u>	<u>-</u>	<u>121</u>
	73,0	23,3	3,7	-	215
февраль	<u>64,1</u>	<u>29,5</u>	<u>6,4</u>	<u>-</u>	<u>78</u>
	82,9	15,7	1,4	-	146
март	<u>57,7</u>	<u>30,8</u>	<u>7,7</u>	<u>3,8</u>	<u>52</u>
	74,7	21,9	3,4	-	146

Примечание: В числителе приведены данные, относящиеся к облакам с осадками, в знаменателе – к облакам без осадков.

Из анализа этого материала следует, что по-прежнему, как и в случаях с осадками, так и без осадков, преобладает однослойная облачность. Повторяемость осадконесущих облаков составляет 66,2-63,9%, а без осадков – 73,1-72,4%. Таким образом, выявленная ранее закономерность в распределении расслоенности ВОБЛ с осадками и без осадков остается справедливой как в отношении ВОБЛ с осадками, так и без осадков.

При двухслойной облачности повторяемость осадконесущих облаков изменяется от 25,9% в декабре до 36,4% в январе, а без осадков – от 15,7% в феврале до 21,6% в декабре.

Таким образом, в холодный период, когда наблюдается двухслойная облачность, преобладают осадконесущие облака, что также можно отнести к выявленной закономерности в расслоенности облаков.

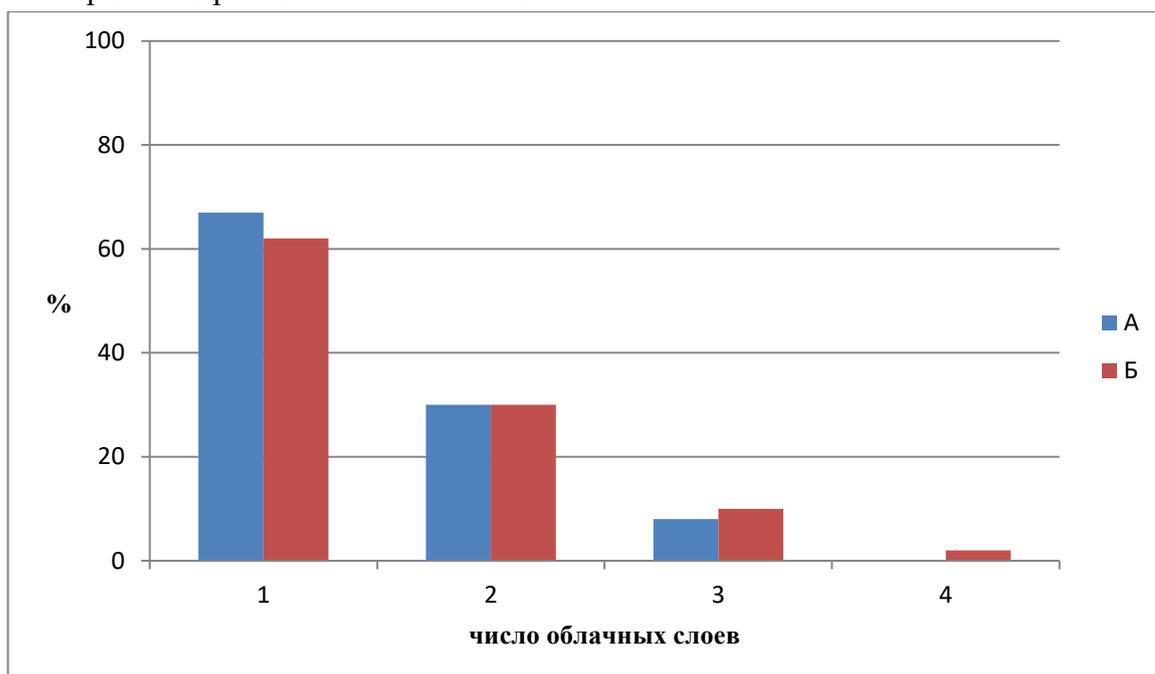


Рисунок 2.2. Повторяемость ВОБЛ (без Ас) с осадками для зимы (А) и холодного полугодия (Б)

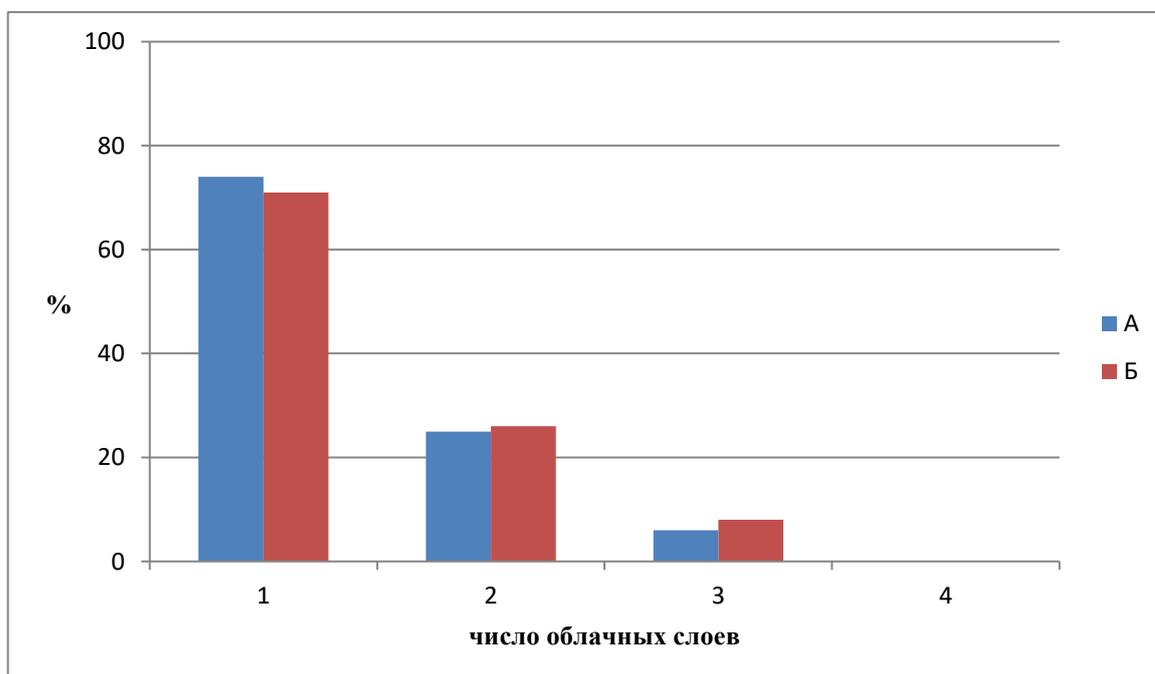


Рисунок 2.3. Повторяемость ВОБЛ (без Ас) без осадков для зимы (А) и холодного полугодия (Б)

При трехслойной волнистообразной облачности так же чаще наблюдаются облака с осадками, но повторяемость их не превышает 8%, понижаясь в декабре и январе до 3%.

Общее представление о расслоенности СОБЛ можно получить из данных, приведенных в таблице 2.3 и на рисунке 2.4. Их анализ позволяет выявить следующие закономерности в распределении расслоенности СОБЛ. Видно, что СОБЛ присуща

значительная расслоенность. Общим для всех месяцев является преобладание двухслойных облаков. Повторяемость таких облаков зимой составляет 36,5%, в холодное полугодие – 35,3%. Существенна повторяемость одно- и трехслойной облачности. Так, повторяемость однослойных облаков изменяется в пределах 17,6-26,1%, а трехслойных – от 19,6 до 32,7%. Четырехслойные облака встречаются не чаще, чем в 13% случаев. Еще реже наблюдается пяти- и шестислойная облачность, на долю которой приходится 6 и 2% соответственно.

Таблица 2.3

Повторяемость (%) расслоенности СОБЛ (с осадками и без осадков)

Месяц	Число облачных слоев						Число зондирований
	один	два	три	четыре	пять	шесть	
ноябрь	19,2	32,1	32,7	12,8	1,3	1,9	156
декабрь	17,6	36,3	28,4	11,3	5,9	0,5	204
январь	22,9	40,6	19,6	13,1	1,9	1,9	214
февраль	26,1	36,2	26,6	8,7	2,4	-	207
март	23,1	36,9	27,2	10,3	1,5	1,0	195

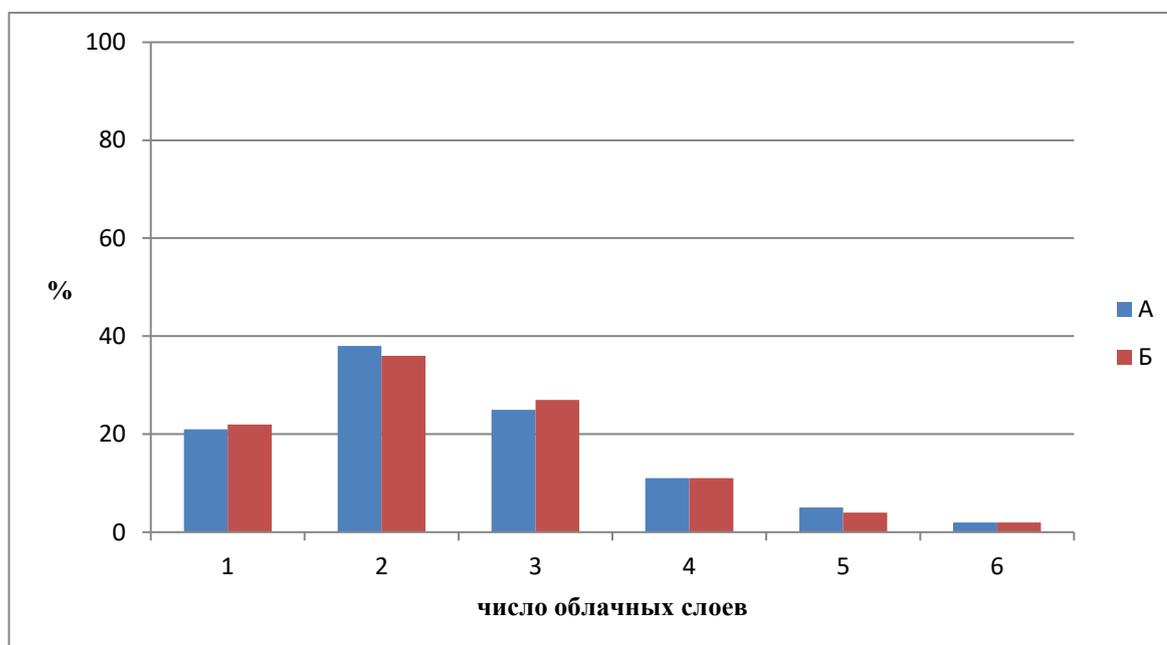


Рисунок 2.4. Повторяемость слоистообразных облаков для зимы (А) и холодного полугодия (Б)

Данные о расслоенности СОБЛ с осадками и без осадков приведены в таблице 2.4 и на рисунках 2.5 и 2.6. Из анализа этого материала следует, что на фронтах с осадками и без осадков преобладают в основном двух- и трехслойные облака.

Таблица 2.4

Повторяемость (%) расслоенности слоистообразных облаков

Месяц	Число облачных слоев						Число зондирования
	один	два	три	четыре	пять	шесть	
ноябрь	<u>12,5</u>	<u>34,3</u>	<u>35,4</u>	<u>15,6</u>	<u>1,1</u>	<u>1,1</u>	<u>96</u>
	30,0	28,3	28,3	8,3	1,7	3,4	60
декабрь	<u>22,0</u>	<u>29,1</u>	<u>29,8</u>	<u>12,7</u>	<u>5,7</u>	<u>0,7</u>	<u>141</u>
	7,9	52,4	25,4	7,9	6,4	-	63

Месяц	Число облачных слоев						Число зондирования
	один	два	три	четыре	пять	шесть	
январь	<u>22,0</u>	<u>40,7</u>	<u>19,3</u>	<u>14,0</u>	<u>2,7</u>	<u>1,3</u>	<u>150</u>
	25,0	40,7	20,3	10,9	-	3,1	64
февраль	<u>23,3</u>	<u>35,9</u>	<u>28,3</u>	<u>9,2</u>	<u>3,3</u>	-	<u>120</u>
	29,9	36,8	24,2	8,0	1,1	-	87
март	<u>20,5</u>	<u>33,8</u>	<u>29,1</u>	<u>12,6</u>	<u>2,4</u>	<u>1,6</u>	<u>127</u>
	27,9	42,7	23,5	5,9	-	-	68

Примечание: В числителе приведены данные, относящиеся к фронтам с осадками, в знаменателе – без осадков.

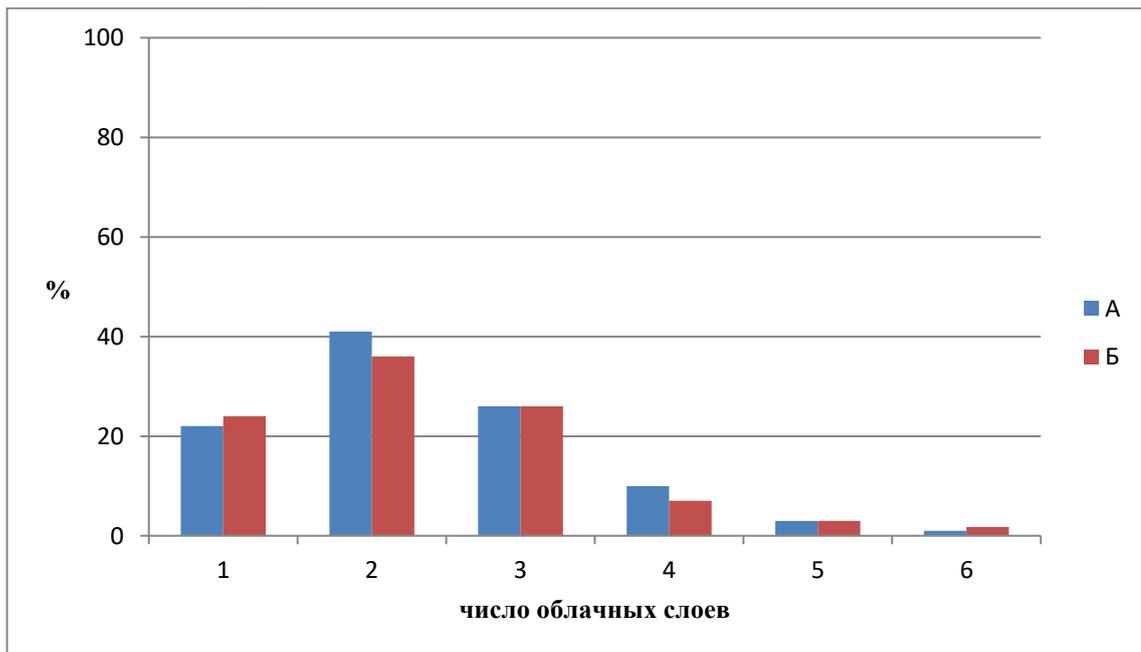


Рисунок 2.5. Повторяемость (%) слоистообразных облаков без осадков для зимы (А) и холодного полугодия (Б)

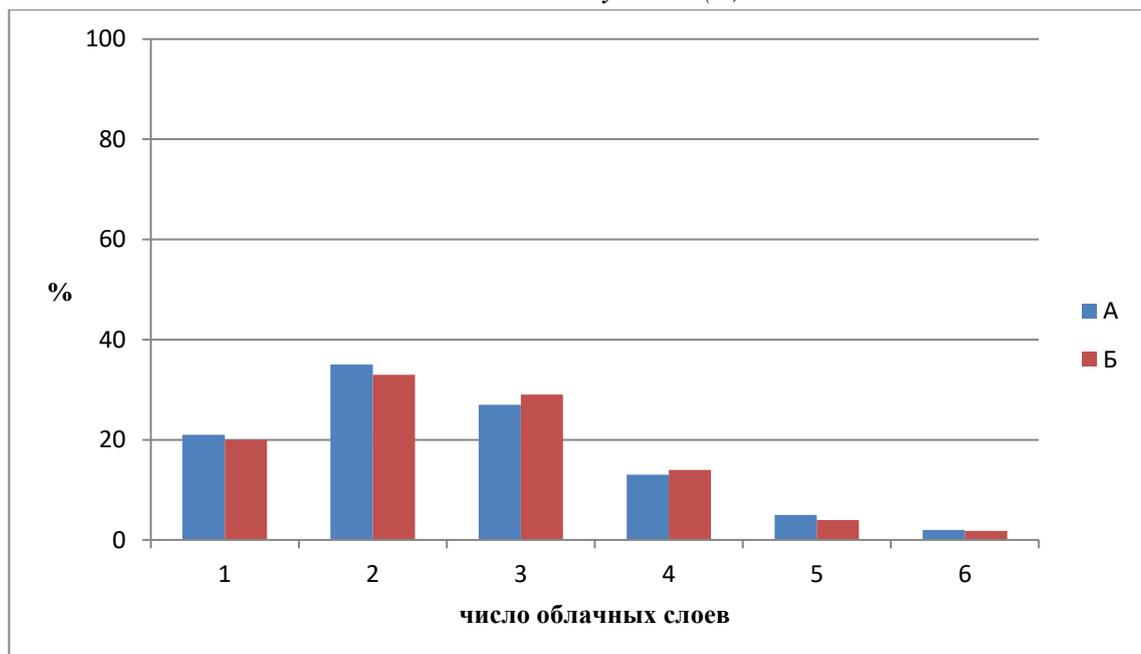


Рисунок 2.6. Повторяемость (%) слоистообразных облаков с осадками для зимы (А) и холодного полугодия (Б)

Средняя повторяемость двухслойных осадконесущих облаков зимой составляет 34,5%, в холодное полугодие – 33,6%, а трехслойных – 27,3 и 29,1% соответственно. При наличии облачности без осадков аналогичные показатели равны 40,2 и 38,6% для двухслойных облаков, 25,2 и 25,7% – для трехслойных.

Однослойные слоистообразные облака встречаются реже. Повторяемость таких облаков на фронтах с осадками составляет 19,1%, на фронтах без осадков – 24% (холодное полугодие).

С увеличением числа облачных слоев повторяемость таких облаков существенно уменьшается. Так, например, повторяемость пятислойных СОБЛ с осадками и без осадков в холодное полугодие над Москвой не превышает 6%.

Полученные данные свидетельствуют также о том, что на фронтах преобладают облака с числом слоев не более трех. Повторяемость СОБЛ с осадками и с таким числом слоев в период с ноября по март составляет 80,9-87,5%, без осадков – 85,7-94,1%.

В первом приближении подобное распределение числа облачных слоев на фронтах можно объяснить особенностями эволюции барических образований над континентальными районами ЕТР. Зародившиеся над западными, северо-западными и южными районами Северного полушария циклонические образования, выходя на континент, начинают ослабевать. В связи с этим облачные системы на фронтах становятся менее мощными и расслаиваются.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что над центральным районом ЕТР в холодное полугодие ВОБЛ в большинстве случаев являются однослойными. Характерной особенностью СОБЛ является их расслоенность. Выявленные закономерности в распределении расслоенности облачных систем целесообразно использовать при обработке технологии засева облаков и планировании соответствующих операций. Результаты исследований, связанные с изучением расслоенности волнистообразных и слоистообразных облаков опубликованы в работах [65-66, 70].

2.2. Фазовая структура облачности

Важной характеристикой облаков, необходимой при планировании, организации и проведении работ по их засеву, является фазовая структура. При прочих равных условиях фазовое состояние облаков (жидкое, смешанное, кристаллическое и т.д.) во многом определяет выбор типа реагента, технологию засева облаков и, вообще, возможность достижения поставленной цели.

В связи с этим в интересах оценки целесообразности развертывания широкомасштабных работ по воздействию на облака в конкретном ФГР, их планирования и организации, необходимо исследование пространственно-временного распределения фазового состояния облачных систем.

Результаты исследования фазовой структуры ВОБЛ для центрального района ЕТР представлены на рисунке 2.7 и в таблице 2.5. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы в отношении выявленных закономерностей в распределении фазовой структуры ВОБЛ [68-69].

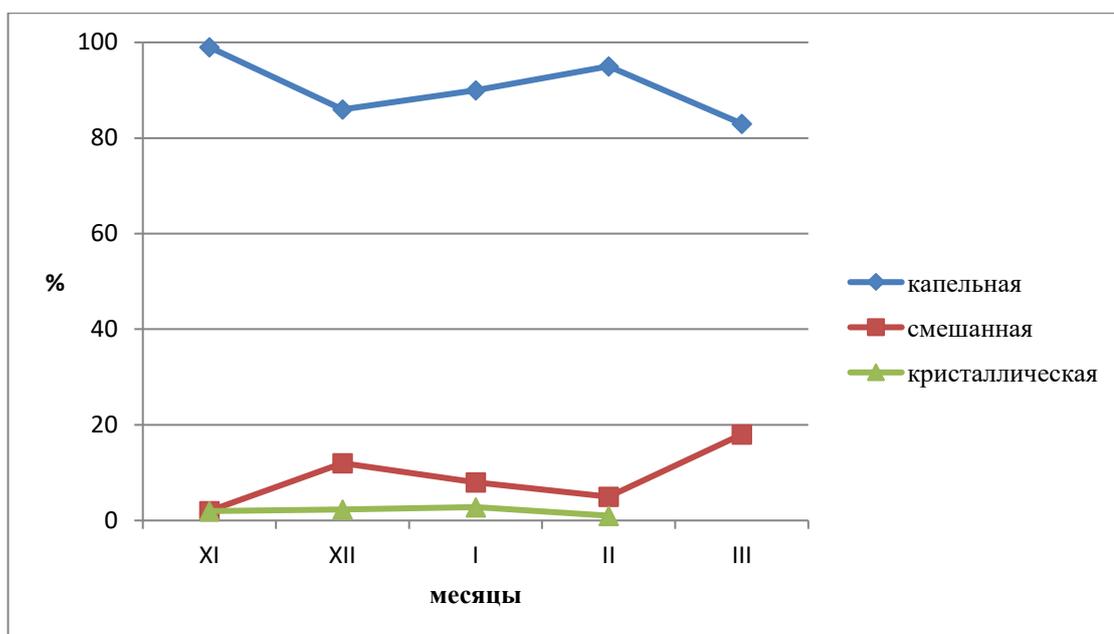


Рисунок 2.7. Повторяемость фазовой структуры волнистообразных облаков по месяцам

Таблица 2.5

Повторяемость (%) фазового состояния волнистообразных облаков

Сезон, полугодие	Форма облаков	Фазовая структура					Число случаев
		капельная	кап. до H_1 , выше смешанная	смешанная	смеш. до H_1 , выше кристаллическая	кристаллическая	
зима	St	88,4	-	11,6	-	-	121
	Sc	91,4	0,3	6,9	0,3	1,1	360
холодное	St	90,7	-	8,8	-	0,5	216
	Sc	91,8	0,2	7,1	0,2	0,7	588

Для St-Sc облаков характерно преобладание в течение холодного полугодия жидкокапельной фазы. При этом как для слоистых, так и для слоисто-кучевых облаков повторяемость капельной фазы почти одинакова и составляет не менее 88% для St и 91% для Sc облаков. При рассмотрении данных, приведенных на рисунке 2.7, видно, что St-Sc облака чаще всего жидкокапельными бывают в ноябре (98,0%) и феврале (95,2%) и несколько реже в декабре (87,1%) и марте (84,3%). Преобладание жидкокапельной фазы во ВОБЛ объясняется тем, что они, как правило, являясь подынверсионными и относительно маломощными, образуются при адвекции теплого влажного воздуха на холодную подстилающую поверхность [100].

Уменьшение повторяемость жидкокапельных ВОБЛ зимой можно объяснить преобладанием пониженного фона температур во всем пограничном слое атмосферы, что приводит к закономерному повышению в них смешанной фазы. Так, например, смешанные ВОБЛ наблюдаются в декабре в 11,3% случаев. При этом зимой смешанная фаза чаще отмечается в St облаках (11,6%), чем в Sc (6,9%). Интересными представляются данные, свидетельствующие об уменьшении повторяемости жидкокапельных облаков в марте (84,3%) и соответствующем увеличении повторяемости в них смешанной фазы (15,7%). Эти особенности распределения фазовой структуры ВОБЛ в марте можно объяснить, по-видимому, увеличением повторяемости прорыва холодных воздушных масс с севера и северо-востока и развитием конвективного обмена. Однако, для окончательного

заклучения требуется проведение специального синоптико-климатологического исследования.

Полученные данные о фазовой структуре ВОБЛ свидетельствуют также о том, что помимо капельной и смешанной фаз, в них могут встречаться слои как с чисто кристаллической фазой, так и с более сложной фазовой структурой. Однако, повторяемость таких случаев крайне мала и не превышает 1,0% (таблица 2.5).

Полученные в диссертации вывод о наличии более сложной (по сравнению с принятой трехвидовой – капельная, смешанная, кристаллическая [100]) фазовой структурой ВОБЛ над центральным районом ЕТР согласуется с результатами других авторов. Так, в частности, в [51] указывается, что в районе Хабаровска также выделено 5 типов фазовой структуры слоистых, слоисто-кучевых облаков.

Анализ полученных данных указывает на то, что в холодное полугодие с точки зрения фазовой структуры ВОБЛ практически всегда пригодны для засева как с помощью хладореагентов, так и кристаллических веществ.

Результаты исследования фазовой структуры слоистообразных облаков с осадками и без осадков помещены в таблицах 2.6 и 2.7. Из приведенных материалов следует, что наиболее простую фазовую структуру имеют St-Sc облака, находящиеся в зоне фронтов. Так, на фронтах без осадков St и Sc облака в холодное полугодие почти всегда бывают капельными (в 100% и 95,8% случаев соответственно). На фронтах с осадками эти облака в большинстве случаев также являются капельными. Однако, в отличии от фронтов без осадков, в этих ситуациях повторяемость смешанной фазы в St-Sc облаках заметно возрастает и составляет зимой 25,0% для St, 15,9% - для Sc облаков.

Преобладание жидкокапельной фазы характерно также и для высоко-кучевых облаков (Ac), наблюдающихся на фронтах с осадками и без осадков. При этом в первом случае эти облака в жидкокапельном виде встречаются зимой несколько реже, чем на фронтах без осадков (73,3% и 80,9% соответственно). Повторяемость смешанной фазы в Ac облаках на фронтах с осадками составляет в этот сезон 16,7%, без осадков – 9,5%.

Повторяемость кристаллических Ac облаков в течение холодного полугодия не более 6,0-12,3%.

Анализ приведенных в таблицах 2.6 и 2.7 сведений показывает, что наиболее сложную фазовую структуру имеют высоко-слоистые, и особенно Ns, Ns-Ac облака. Применительно к центральному району ЕТР в работе выделено девять типов фазовой структуры этих облаков. Из полученных данных видно, что зимой и в холодное полугодие Ac облака чаще всего являются кристаллическими, особенно на фронтах без осадков (63,0% и 64,3%). Смешанные облака этих форм встречаются не более, чем в 24,0% случаев на фронтах с осадками и не более, чем в 15,0% случаев на фронтах без осадков. Несмотря на значительные высоты их расположения и низкие значения температур, Ac облака могут находиться в жидкокапельном состоянии. Повторяемость таких облаков в холодное полугодие составляет 11,2-15,6%. Более сложные типы фазовой структуры Ac облаков встречаются гораздо реже, на их повторяемость приходится не более 3-5% случаев.

Повторяемость (%) фазовой структуры слоистообразных облаков без осадков

Сезон, полугодие	Форма облаков	Фазовая структура									Число случаев
		капельная	кап. до H_1 , выше смешанная	кап. до H_2 , выше кристаллич.	смешанная	смеш. до H_1 , выше капельная	смеш. до H_2 , выше кристаллич.	кристалл- лическая	крист. до H_1 , выше смешан.	капельн. до H_2 , выше до H_1 смешан. выше кристалл.	
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
зима	St	100	-	-	-	-	-	-	-	-	12
	Sc	96,8	-	-	3,2	-	-	-	-	-	31
	Ac	80,9	4,8	-	9,5	-	-	4,8	-	-	21
	Ns, Ns- As	76,0	4,0	-	4,0	-	4,0	12,0	-	-	25
	As	11,1	1,9	1,9	14,8	-	1,9	63,0	1,9	3,7	54
холодное	St	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	19
	Sc	95,8	-	-	4,2	-	-	-	-	-	48
	Ac	73,5	5,9	-	11,8	-	-	5,9	2,9	-	34
	Ns, Ns- As	77,5	3,2	-	3,2	-	-	5,9	2,9	-	31
	As	11,2	2,0	1,0	14,3	-	3,1	64,3	1,0	3,1	98

Повторяемость (%) фазовой структуры слоистообразных облаков с осадками

Сезон, полугодие	Форма облаков	Фазовая структура									Число случаев
		капельная	кап. до H_1 , выше смешанная	кап. до H_2 , выше кристаллич.	смешанная	смеш. до H_1 , выше капельная	смеш. до H_2 , выше кристаллич.	кристалл- лическая	крист. до H_1 , выше смешан.	капельн. до H_2 , выше до H_1 смешан. выше кристалл.	
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
зима	St	75,0	-	-	25,0	-	-	-	-	-	20
	Sc	81,8	-	-	15,9	-	-	2,3	-	-	44
	Ac	73,3	-	-	16,7	-	-	10,0	-	-	30
	Ns, Ns- As	66,2	3,3	3,3	9,9	1,3	4,6	10,6	-	0,7	151
	As	14,1	1,1	3,3	23,9	2,2	5,4	45,6	3,3	1,1	92
холодное	St	84,4	-	-	15,6	-	-	-	-	-	32
	Sc	78,0	-	-	17,6	-	-	4,4	-	-	68
	Ac	64,6	-	-	21,6	-	-	12,3	1,5	-	65
	Ns, Ns- As	62,3	6,3	4,2	12,6	1,7	4,2	7,9	-	0,8	239
	As	15,6	0,7	2,2	23,0	1,5	5,2	48,9	2,2	0,7	135

Сложная фазовая структура присуща также и Ns, Ns-As облакам. Вместе с тем, можно видеть, что для этих форм облаков, как на фронтах с осадками, так и без осадков, характерно преобладание жидкокапельной фазы. Повторяемость таких облаков составляет в холодное полугодие 62,3% и 77,5% соответственно. Наличие смешанной фазы в слоисто-дождевых облаках чаще отмечается на фронтах с осадками. Повторяемость их в этом случае составляет в холодное полугодие 12,6%. Чисто кристаллическими Ns облака наблюдаются также редко. Так, повторяемость их на фронтах без осадков – не более 12,9%, а на фронтах с осадками – 7,9%.

Следует отметить, что выявленные в диссертации закономерности в распределении фазовой структуры Ns и As облаков, а также облачных систем Ns-As согласуются с результатами других авторов, касающихся исследования фазового состояния облаков этих форм в других районах ЕТР (в частности, северо-западного района ЕТР [184]).

Таким образом, полученные в работе данные о преобладании капельной и смешанной фаз в слоистообразных облаках свидетельствуют, как и в случае с ВОБЛ, о возможности широкого применения в работах по воздействию на облака с помощью как кристаллизирующих веществ, так и хладореагентов.

Представленные данные о фазовой структуре СОБЛ и ВОБЛ над центральным районом ЕТР в значительной мере уточняют имеющиеся в литературе сведения об этой их важной характеристике и могут быть использованы в практике работ по засеву облачности.

Результаты исследований, связанные с анализом фазовой структурой волнистообразных и слоистообразных облаков опубликованы в работе [69].

2.3. Водность и водозапас облачности

Водность облаков, т.е. масса капель воды и кристаллов льда, содержащихся в единичном объеме воздуха, является одной из наиболее важных характеристик облачности. Данные о водности облаков различных форм и их водозапасах необходимы для оценки возможности засева с целью рассеяния облачного покрова, исследования возможности восстановления облаков, а также расчета количества искусственных осадков.

Исходя из этого, в результате обработки экспериментальных данных в работе приведены статистические характеристики водности и водозапасов ВОБЛ и СОБЛ над центральным районом ЕТР, анализ которых позволяет выявить следующие закономерности в их распределении. Из анализа полученных данных видно, что распределение среднемесячных значений водности и водозапасов ВОБЛ характеризуется их возрастанием, как правило, от зимы к весне и осени (таблицы 2.8 и 2.9). Так, например, если значения средней водности и водозапасов слоистых облаков в январе составляют $0,20 \text{ г/м}^3$ и $78,0 \text{ г/м}^2$, то в марте и ноябре они составляют $0,30 \text{ г/м}^3$ и $117,0 \text{ г/м}^2$, и $0,29 \text{ г/м}^3$ и $157,0 \text{ г/м}^2$ соответственно. В целом же средние значения водности St-Sc облаков в холодное полугодие находятся в пределах $0,16-0,33 \text{ г/м}^3$, а водозапасов – $64,0-158,0 \text{ г/м}^2$. Вместе с тем, как это следует из данных таблиц 2.10 и 2.11, чаще всего в этот период слоистые облака имеют значения водности, лежащие в диапазоне $0,06-0,35 \text{ г/м}^3$ (59,0%), слоисто-кучевые – $0,06-0,20 \text{ г/м}^3$ (66,0%), а водозапасов в грациях $31,0-120,0 \text{ г/м}^2$ (47,2%) и $0,1-90,0 \text{ г/м}^2$ (53,7%) соответственно.

Данные о статистических характеристиках водности и водозапаса СОбЛ обобщены в таблицах 2.12-2.15. Из их анализа видно, что наибольшие значения водности ($0,20-0,24 \text{ г/м}^3$) характерны для слоисто-кучевых и слоисто-кучевых и слоистых облаков. При этом чаще всего в холодное полугодие встречаются слои со значениями водности в диапазонах $0,11-0,15 \text{ г/м}^3$ (33,3%) для St и $0,16-0,20 \text{ г/м}^3$ (19,1%) для Sc облаков (таблица 2.14). Высоко-кучевые и слоисто-дождевые облака имеют несколько меньшие значения водности: $0,17-0,22 \text{ г/м}^3$. Если рассматривать среднемесячные значения водности Ns облаков, то оказывается, что в ноябре и декабре они являются наибольшими, $0,29 \text{ г/м}^3$ и $0,30 \text{ г/м}^3$, уменьшаясь до $0,21 \text{ г/м}^3$ в марте и $0,13 \text{ г/м}^3$ и $0,14 \text{ г/м}^3$ в январе и феврале. Однако чаще встречаются в холодное полугодие слоисто-дождевые облака со значениями водности в диапазоне $0,06-0,25 \text{ г/м}^3$ (52,2%) (таблица 2.14).

Иная картина наблюдается при анализе распределения значений водозапаса СОбЛ. В этом случае наиболее водными являются слоисто-дождевые облака со средними значениями, равными 260 г/м^2 . Несмотря на то, что средние значения водозапаса для высоко-слоистых облаков оказались достаточно большими (порядка 180 г/м^2), тем не менее чаще всего они бывают не более 60 г/м^2 (55,6%) (таблица 2.15).

Для остальных форм облаков на фронтах значения водозапаса сравнительно мало отливаются друг от друга и находятся в пределах $90-120 \text{ г/м}^2$ (таблица 2.15). Анализируя данные о водозапасах СОбЛ, можно видеть, что для холодного полугодия наиболее характерны облачные слои со значениями водозапаса, не превышающими 180 г/м^2 для слоистых (87,5%), 120 г/м^2 для слоисто-кучевых (70,6%) и высоко-кучевых (73,3%) и 240 г/м^2 для слоисто-дождевых (55,0%) облаков.

В целом, завершая анализ полученных данных о водности и водозапасах СОбЛ и ВОБЛ, можно отметить, что этих характеристикам присущи существенные колебания. Об этом свидетельствуют также значения среднеквадратических отклонений и коэффициентов вариации, приведенные в таблицах 2.8, 2.9, 2.12 и 2.13. Колебания характеристик водности и водозапаса СОбЛ и ВОБЛ обусловлены в значительной мере пространственно-временной неоднородностью слоистообразных облаков [100, 178].

Таблица 2.8

Средние значения водности ВОБЛ (числитель) и ее среднеквадратические отклонения (знаменатель)

Форма облаков	Ноябрь	Число случаев	Декабрь	Число случаев	Январь	Число случаев	Февраль	Число случаев	Март	Число случаев	Зима	Число случаев	Холодное полугодие	Число случаев
St	$\frac{0,29}{0,16}$ (55,2)	64	$\frac{0,33}{0,18}$ (54,5)	49	$\frac{0,20}{0,10}$ (50,0)	16	$\frac{0,16}{0,07}$ (43,8)	12	$\frac{0,30}{0,22}$ (73,3)	16	$\frac{0,25}{0,13}$ (52,0)	73	$\frac{0,27}{0,16}$ (59,3)	154
Sc	$\frac{0,26}{0,17}$ (65,4)	87	$\frac{0,20}{0,12}$ (60,0)	79	$\frac{0,16}{0,09}$ (56,3)	85	$\frac{0,16}{0,09}$ (56,3)	59	$\frac{0,21}{0,17}$ (81,0)	67	$\frac{0,17}{0,10}$ (58,8)	218	$\frac{0,17}{0,09}$ (52,9)	347

Примечание: Здесь и в таблицах 2.9, 2.12 и 2.13 в скобках приведены значения коэффициентов вариации водозапасов облаков

Таблица 2.9

Средние значения водозапасов ВОБЛ (числитель) и их среднеквадратические отклонения (знаменатель)

Форма облаков	Ноябрь	Число случаев	Декабрь	Число случаев	Январь	Число случаев	Февраль	Число случаев	Март	Число случаев	Зима	Число случаев	Холодное полугодие	Число случаев
St	$\frac{157,0}{100,0}$ (63,7)	35	$\frac{158,0}{103,0}$ (65,2)	30	$\frac{78,0}{47,0}$ (60,3)	11	$\frac{73,0}{53,0}$ (72,6)	12	$\frac{117,0}{99,0}$ (84,6)	10	$\frac{110,0}{72,0}$ (65,5)	51	$\frac{119,0}{76,0}$ (63,4)	93
Sc	$\frac{113,0}{86,0}$ (76,1)	53	$\frac{89,0}{67,0}$ (75,3)	53	$\frac{66,0}{49,0}$ 74,2	57	$\frac{69,0}{53,0}$ (76,8)	43	$\frac{64,0}{63,0}$ (98,4)	46	$\frac{69,0}{50,0}$ (73,9)	148	$\frac{76,0}{60,0}$ (78,9)	246

Таблица 2.10

Статистические оценки числовых характеристик распределения водности ВОБЛ

Сезон, полугодие	Формы облаков	Повторяемость (%) водности (г/м ³)															Среднее				Число случаев
		0,01-0,05	0,06-0,10	0,11-0,15	0,16-0,20	0,21-0,25	0,26-0,30	0,31-0,35	0,36-0,40	0,41-0,45	0,46-0,50	0,51-0,55	0,56-0,60	0,61-0,65	0,66-0,70	0,71-0,75	\bar{q}	$\sigma_{\bar{q}}$	$\sigma_{\bar{q}}$	$\sigma_{\sigma_{\bar{q}}}$	
зима	St	1,4	8,2	19,2	19,2	3,2	13,7	11,0	4,1	6,9	2,7	2,7	2,7				0,25	0,13	0,015	0,011	73
	Sc	6,0	22,0	24,7	18,3	10,6	7,8	4,6	1,8	2,8	1,4						0,17	0,10	0,007	0,005	218
холодное	St	2,6	9,7	13,7	14,9	9,7	11,0	11,0	9,1	4,6	3,3	2,6	3,9	2,0	0,6	1,3	0,27	0,16	0,013	0,009	154
	Sc	4,3	21,9	25,4	18,7	11,2	8,4	4,9	2,9	2,3							0,17	0,09	0,005	0,003	347

Статистические оценки числовых характеристик распределения водозапаса ВОБЛ

Сезон, полугодие	Формы облаков	Повторяемость (%) водозапаса (г/м ²)											Среднее				Число случаев
		0,1-30	31-60	61-90	91-120	121-150	151-180	181-210	211-240	241-270	271-300	301-330	\bar{w}	$\sigma_{\bar{w}}$	$\sigma_{\bar{w}}$	$\sigma_{\sigma_{\bar{w}}}$	
зима	St	1,4	8,2	19,2	19,2	3,2	13,7	11,0	4,1	6,9	2,7	2,7	0,25	0,13	0,015	0,011	73
	Sc	6,0	22,0	24,7	18,3	10,6	7,8	4,6	1,8	2,8	1,4		0,17	0,10	0,007	0,005	218
холодное	St	2,6	9,7	13,7	14,9	9,7	11,0	11,0	9,1	4,6	3,3	2,6	0,27	0,16	0,013	0,009	154
	Sc	4,3	21,9	25,4	18,7	11,2	8,4	4,9	2,9	2,3			0,17	0,09	0,005	0,003	347

Таблица 2.12

Средние значения водности СОБЛ (числитель) и их среднеквадратические отклонения (знаменатель)

Сезон, полугодие	Формы облачности									
	St	Число случаев	Sc	Число случаев	Ac	Число случаев	Ns	Число случаев	As	Число случаев
зима	$\frac{0,20}{0,09}(45,0)$	25	$\frac{0,24}{0,15}(62,5)$	53	-	-	$\frac{0,17}{0,09}(52,9)$	97	$\frac{0,14}{0,08}(57,1)$	9
холодное	$\frac{0,20}{0,09}(45,0)$	36	$\frac{0,23}{0,14}(60,9)$	73	$\frac{0,21}{0,18}(85,7)$	22	$\frac{0,22}{0,15}(68,2)$	м	$\frac{0,16}{0,08}(50,0)$	15

Таблица 2.13

Средние значения водозапасов СОБЛ (числитель) и их среднеквадратические отклонения (знаменатель)

Сезон, полугодие	Формы облачности									
	St	Число случаев	Sc	Число случаев	Ac	Число случаев	Ns	Число случаев	As	Число случаев
зима	$\frac{105,0}{75,0}(71,4)$	17	$\frac{117,0}{113,0}(96,6)$	29	$\frac{96,0}{68,0}(70,8)$	6	$\frac{260,0}{219,0}(84,2)$	69	$\frac{182,0}{150,0}(82,4)$	6
холодное	$\frac{112,0}{69,0}(61,6)$	24	$\frac{106,0}{99,0}(93,4)$	44	$\frac{90,0}{75,0}(83,3)$	15	$\frac{263,0}{213,0}(81,0)$	109	$\frac{178,0}{165,0}(90,7)$	9

Статистические оценки числовых характеристик распределения водности в СОБЛ

Сезон, полугодие	Формы облаков	Повторяемость (%) водности (г/м ³)														Среднее				Число случаев
		0,01-0,05	0,06-0,10	0,11-0,15	0,16-0,20	0,21-0,25	0,26-0,30	0,31-0,35	0,36-0,40	0,41-0,45	0,46-0,50	0,51-0,55	0,56-0,60	0,61-0,65	0,66-0,70	\bar{q}	$\sigma_{\hat{q}}$	$\sigma_{\bar{q}}$	$\sigma_{\sigma_{\hat{q}}}$	
зима	St	4,0	8,0	40,0	-	20,0	12,0	4,0	12,0	-	-					0,20	0,09	0,018	0,013	25
	Sc	5,7	15,1	11,3	16,9	11,3	13,2	7,5	3,8	3,8	1,9	1,9	5,7	1,9	-	0,24	0,15	0,021	0,015	53
	Ns	3,1	27,8	26,8	15,5	9,2	7,2	9,2	7,2	4,1	4,1	2,1	-			0,17	0,09	0,009	0,006	97
	As	-	55,6	11,1	11,1	11,1	11,1	-	-	-						0,14	0,08	0,028	0,019	9
холодное	St	2,8	8,3	33,3	30,5	6	22,2	13,9	2,8	11,1	-					0,20	0,09	0,015	0,011	36
	Sc	5,5	15,1	12,3	19,1	12,3	15,1	5,5	2,7	2,7	1,4	1,4	5,5	1,4	-	0,23	0,14	0,016	0,012	73
	Ac	13,7	27,5	18,2	4,5	4,5	4,5	4,5	-	9,1	4,5	4,5	-	4,5	-	0,21	0,18	0,039	0,027	22
	Ns	4,0	18,2	20,4	13,6	13,1	10,2	4,0	4,0	2,3	3,4	2,3	1,1	1,7	1,7	0,22	0,15	0,011	0,008	176
	As	-	46,6	6,7	13,3	26,7	6,7	-	-	-						0,16	0,08	0,021	0,015	15

Таблица 2.15

Статистические оценки числовых характеристик распределения водозапаса СОБЛ

Сезон, полугодие	Формы облаков	Повторяемость (%) водозапаса (г/м ²)														Среднее				Число случаев
		0,1-60	61-120	121-180	181-240	241-300	301-360	361-420	421-480	481-540	541-600	601-660	661-720	721-780	781-840	\bar{w}	$\sigma_{\hat{w}}$	$\sigma_{\bar{w}}$	$\sigma_{\sigma_{\hat{w}}}$	
зима	St	29,4	29,4	29,4	5,9	-	5,9	-								105,0	75,0	18,75	13,06	17
	Sc	48,3	27,6	-	6,9	3,4	6,9	6,9								117,0	113,0	21,35	14,96	29
	Ac	33,3	33,3	-	33,3	-	-	-								96,0	68,0	30,41	20,50	6
	Ns	14,5	18,9	13,0	10,2	8,7	11,6	5,8	-	2,9	2,9	1,4	2,9	4,3	2,9	260,0	219,0	26,55	18,71	69
	As	50,0	-	-	-	16,7	16,7	16,7								182,0	150,0	67,08	45,22	6
холодное	St	20,8	37,5	29,2	8,3	-	4,2	-								112,0	69,0	14,38	10,06	24
	Sc	47,8	22,8	13,6	4,5	2,3	4,5	4,5								106,0	99,0	15,09	10,61	44
	Ac	40,0	33,3	6,7	13,3	6,7	-	-								90,0	75,0	20,04	13,93	15
	Ns	14,7	17,4	12,8	10,1	9,2	12,8	3,7	3,7	1,8	3,7	0,9	2,8	3,7	2,8	263,0	213,0	20,50	14,46	109
	As	55,6	-	-	-	11,1	11,1	11,1	11,1							178,0	165,0	58,34	40,02	9

Полученные в диссертации данные о водности и водозапасах облаков имеют практическое значение и могут быть использованы для решения целого ряда прикладных задач.

Результаты исследований, связанные с изучением водности и водозапасов волнистообразных и слоистообразных облаков, опубликованы в [58].

2.4. Повторяемость переохлажденных слоистых, слоисто-кучевых облаков

Возможность и целесообразность проведения работ по воздействию на облака и туманы во многом определяется повторяемостью этих атмосферных образований в различных ФГР. Анализ состояния работ в этом направлении показывает, что число публикаций, содержащих сведения о повторяемости теплых и переохлажденных облаков, незначительно [185]. Преобладают работы, в которых сведения о повторяемости ВОБЛ приводятся без учета их температурного режима [154, 170].

В связи с этим, одной из задач исследований являлось определение повторяемости переохлажденных волнистообразных облаков над центральным районом ЕТР с ноября по март, в течение зимы и в холодный период (среднее за 5 месяцев). Результаты соответствующей обработки материалов СЗА приведены на рисунке 2.8. и в таблице 2.16.

Анализ полученных результатов показывает, что ВОБЛ над рассматриваемым районом в течение холодного полугодия в большинстве случаев являются переохлажденными (более 70%). При этом чаще всего переохлажденные облака наблюдаются с декабря по март, когда их повторяемость достигает 91,9-98,2%. Эта закономерность (преобладание переохлажденных облаков) является характерной как для облаков с осадками, так и без осадков (таблица 2.16). Другая особенность состоит в том, что величины повторяемости переохлажденных ВОБЛ с осадками и без осадков практически одинаковы и составляют 95-96% для зимы, 90-92% – для холодного полугодия.

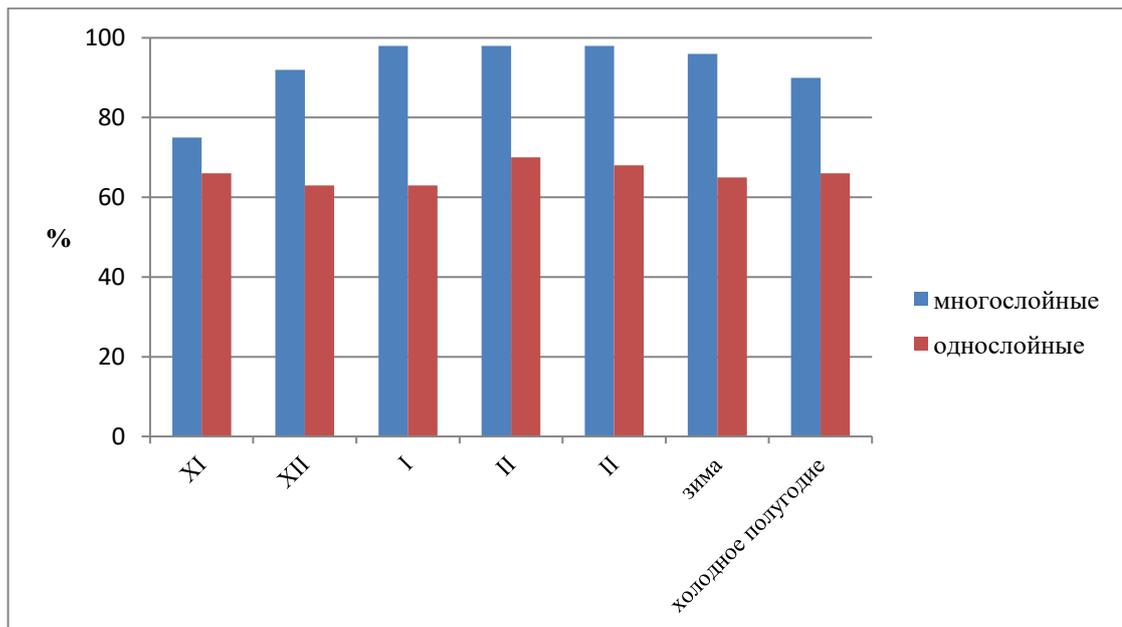


Рисунок 2.8. Повторяемость (%) одно- и многослойных переохлажденных волнистообразных облаков (с осадками и без осадков)

Повторяемость (%) переохлажденных волнистообразных облаков

Пункт	Месяц					Сезон, полугодие	
	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	зима	холодное
Внуково	$\frac{73,0}{76,3}$	$\frac{91,9}{91,9}$	$\frac{97,6}{99,2}$	$\frac{97,3}{98,7}$	$\frac{93,2}{100,0}$	$\frac{95,0}{95,6}$	$\frac{89,3}{92,5}$
Число зондирований	334	383	335	224	198	942	1474

Примечание: В числителе приведены данные, относящиеся к облакам без осадков, в знаменателе – с осадками

Следует отметить, что чаще всего переохлажденные ВОБЛ являются однослойными (рисунок 2.8 и таблица 2.17). В общем числе случаев повторяемость однослойных переохлажденных St-Sc облаков в течение рассматриваемого периода колеблется от 63,5 до 69,9% (рисунок 2.8). при этом однослойные ВОБЛ без осадков в течение всех месяцев (за исключением декабря) встречаются чаще, чем с осадками, хотя в целом для зимы и холодного полугодия эта разница не превышает 6-7% (таблица 2.17).

Таблица 2.17

Повторяемость (%) переохлажденных однослойных волнистообразных облаков

Пункт	Месяц					Сезон, полугодие	
	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	зима	холодное
Внуково	$\frac{69,4}{60,8}$	$\frac{59,7}{69,9}$	$\frac{70,5}{51,3}$	$\frac{74,6}{61,0}$	$\frac{71,5}{58,8}$	$\frac{67,4}{61,1}$	$\frac{68,5}{60,8}$
Число зондирований	247	352	329	219	188	900	1335

Примечание: В числителе приведены данные, относящиеся к облакам без осадков, в знаменателе – с осадками.

Приведенные данные указывают также на то, что в трети случаев наблюдаются ситуации с наличием двух и более слоев переохлажденной облачности. Это обстоятельство необходимо учитывать при планировании и проведении работ по засеву St-Sc облаков, особенно в случаях, когда необходимо проводить ее рассеяние.

Полученный в работе вывод о преобладании над центральным районом ЕТР переохлажденных St-Sc облаков имеет большое практическое значение, обусловленное тем, что на современном этапе наиболее разработанными являются методы и средства засева именно переохлажденных облаков [4-7].

2.5. Характеристики конвективных облаков

Основным исходным материалом для выполнения настоящей работы явились протоколы сетевого СЗА ТАЭ-7,7м над аэропортом Внуково (г. Москва).

Метод СЗА состоит в том, что на специально оборудованном самолете-зондировщике ЛИ-2 поднимались два бортаэролога, которые производили визуальные и инструментальные наблюдения над высотой и характером нижней и верхней границ облачных слоев, микроструктурой и водностью облаков, болтанкой и обледенением

самолета, осадками, оптическими явлениями и т.д. Давление, температура и влажность воздуха определялись с помощью специального самописца – самолетного метеографа. Достижимые высоты определялись потолком подъема самолета-зондировщика ЛИ-2 – 6-6,5 км. Подъем производился в районе аэродрома по кругу радиусом не более 50 км с постоянным углом тангажа. Время на подъем составляло 55-60 минут [186].

Самолетное зондирование атмосферы производилось в 3-6 и 15-18 часов местного солнечного времени. Иногда оно было учащенным – до четырех раз в сутки в научно-исследовательских целях. Более подробно методика СЗА описана в работе [186]. Для решения задач специальных исследований соискателем на основании обработки материалов СЗА в аэропорту Внуково (г. Москва), представленных в сборнике таблиц ТАЭ-7,7м за 1953-1964 гг., была составлена соответствующая выборка.

В выборку вошли случаи наблюдения конвективных облаков *Cu hum* (кучевые плоские), *Cu med* (кучевые средние) и *Cu cong* (мощно-кучевые, не давшие осадков) при проведении самолетного зондирования в 15-18 часов (т.е. времени максимального развития конвекции) с 1 апреля по 30 сентября за указанные годы. Объем выборки составил 843 случая.

Выбор данного исходного материала за указанный период обусловлен тем, что именно в это время в нашей стране производилось регулярное самолетное зондирование атмосферы (два раза в сутки на 28 станциях страны) с целью получения конкретных характеристик различных видов облачности в определенных физико-географических районах. Следует отметить, что самые точные и надежные характеристики облаков могут быть получены только с помощью самолетного зондирования. Никакими другими способами такой высокой точности измерений характеристик облаков достичь невозможно [170]. В середине шестидесятых годов прошлого столетия регулярное самолетное зондирование атмосферы в нашей стране было прекращено и до настоящего времени так и не было возобновлено. Автор полагает, что поскольку физика образования и развития конвективных облаков за период, прошедший после прекращения СЗА, вряд ли сильно изменилась, то выполненные в те годы наблюдения за характеристиками облаков не устарели и соответствуют требованиям современного этапа исследований. В связи с этим представляется возможным использовать имеющиеся в нашей стране материалы СЗА для получения эмпирических характеристик облаков.

В таблице ТАЭ-7,7 м не всегда указывались значения температуры на уровне верхней границы конвективных облаков, особенно для *Cu cong*. В связи с этим их вычисляли по двум ближайшим точкам замеров на указанном уровне верхней границы облака вне облачных сред исходя из реального градиента температуры в данном слое. Тем же способом вычислялась высота изотерм 0 и минус 10°C.

Значения высоты верхней границы облаков *Cu cong* определялись для основного поля облачности и по отдельным наиболее высоким вершинам облаков *Cu med*. За высоту верхней границы облаков при этом принималось наибольшее значение.

Кроме того, рассматривалось фазовое состояние облаков. В случае отсутствия в журнале ТАЭ-7,7 м записей о фазовом состоянии облаков оно оценивалось по графику повторяемости различных фаз облаков в зависимости от температуры [164].

При обработке СЗА было установлено, что вертикальная протяженность *Cu hum* составляет 200-500 м, *Cu med* – от 500 до 1000 м. За нижний предел при отнесении результатов наблюдений к *Cu cong* было принято значение 1000 м. Из приведенных в

работе [187] данных видно, что в районе аэропорта Внуково значения вертикальной протяженности, равные 3000 м, равновероятны как для *Cu cong.*, так и для *Cb*. Поэтому данную величину можно принять за пограничное значение вертикальной протяженности облаков этих форм облаков. Однако вертикальная протяженность облаков не является решающим условием для перехода от стадии *Cu cong.* к *Cb*. Переход к стадии *Cb* связан с изменением фазового строения облака, началом оледенения вершины и выпадением ливневых осадков, достигающих поверхности Земли [188].

В рассматриваемую выборку включены случаи наблюдения облаков, не дающих ливневых осадков, достигающих поверхности Земли. Поэтому все случаи наблюдений облаков мощностью свыше 1000 м отнесены к стадии *Cu cong.*

Ниже приведены результаты, касающиеся конвективных облаков применительно к проблеме воздействия на них с целью вызывания искусственных осадков.

Характеристики конвективных облаков над районом аэропорта Внуково применительно к проблеме воздействия

Исследование конвективных облаков применительно к проблеме воздействия связано с получением данных о ряде их характеристик, одной из которых является повторяемость форм конвективных облаков. Данные о повторяемости конвективных облаков различных форм по месяцам теплого полугодия приведены на рисунке 2.9 [59].

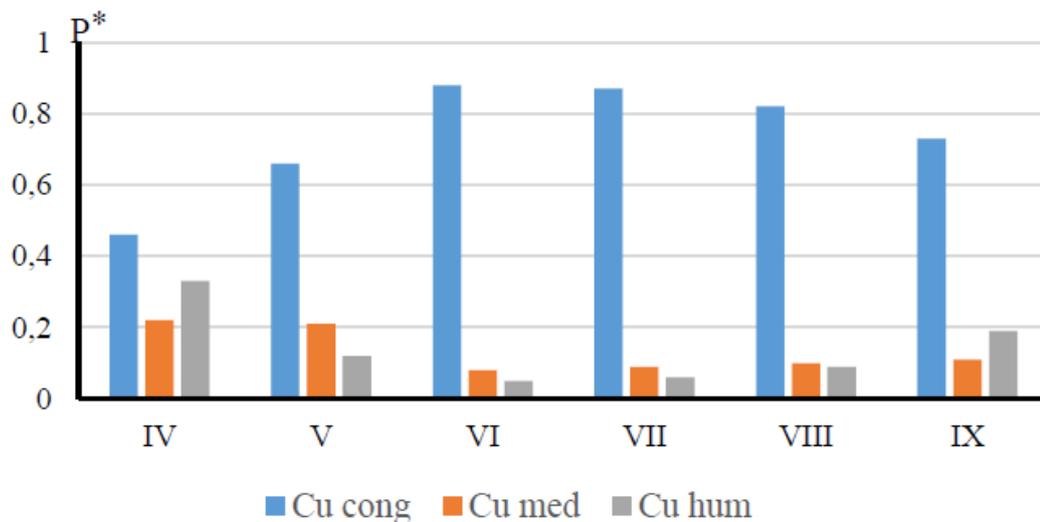


Рисунок 2.9. Повторяемость различных форм конвективных облаков по месяцам теплого полугодия

Из анализа данных, представленных на рисунке 2.9, видно, что наибольшей повторяемостью в послеполуденные часы характеризуются облака *Cu cong*. Максимум повторяемости облаков *Cu hum* и *Cu med* приходится на апрель и сентябрь, причем повторяемость *Cu hum* в указанные месяцы несколько выше, чем *Cu med*. Приведенный ход повторяемости форм конвективных облаков хорошо согласуется как с физикой процесса, так и с результатами, полученными другими авторами для аналогичного периода времени по данным исследовательских полетов в районе аэропортв Внуково [187, 189].

Средняя повторяемость наблюдаемых форм конвективных облаков за три летних месяца (июнь-август) составила: для Cu hum. 7%, Cu med. 8%, Cu cong. 85%.

В целом за теплое полугодие облака Cu hum. наблюдались в 12% случаев, Cu med. – в 13%, Cu cong. – в 75% случаев.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что основным объектом воздействия над рассматриваемым районом в теплое полугодие являются облака Cu cong.

Анализ материалов в области воздействия на конвективные облака показывает, что положительный результат при воздействии на облака этих форм возможен не всегда, а только лишь при определенном сочетании их характеристик. Так, в частности, в результате проведения многочисленных натуральных экспериментов был получен критерий пригодности конвективных облаков к воздействию с целью вызывания искусственных осадков [157]. Согласно этому критерию, пригодными к воздействию считались облака, удовлетворяющие следующим значениями:

- толщина облаков – не менее 2000 м;
- температура воздуха на уровне верхней границы облаков – не выше минус 5°C;
- фазовое состояние облаков – капельное или смешанное.

В соответствии с этим в работе получены данные об указанных выше характеристиках конвективных облаков применительно к проблеме вызывания искусственных осадков.

На рисунке 2.10 приведены гистограмма и кумулята распределения температуры воздуха на уровне верхней границы для всего ансамбля исследуемых облаков за теплое полугодие.

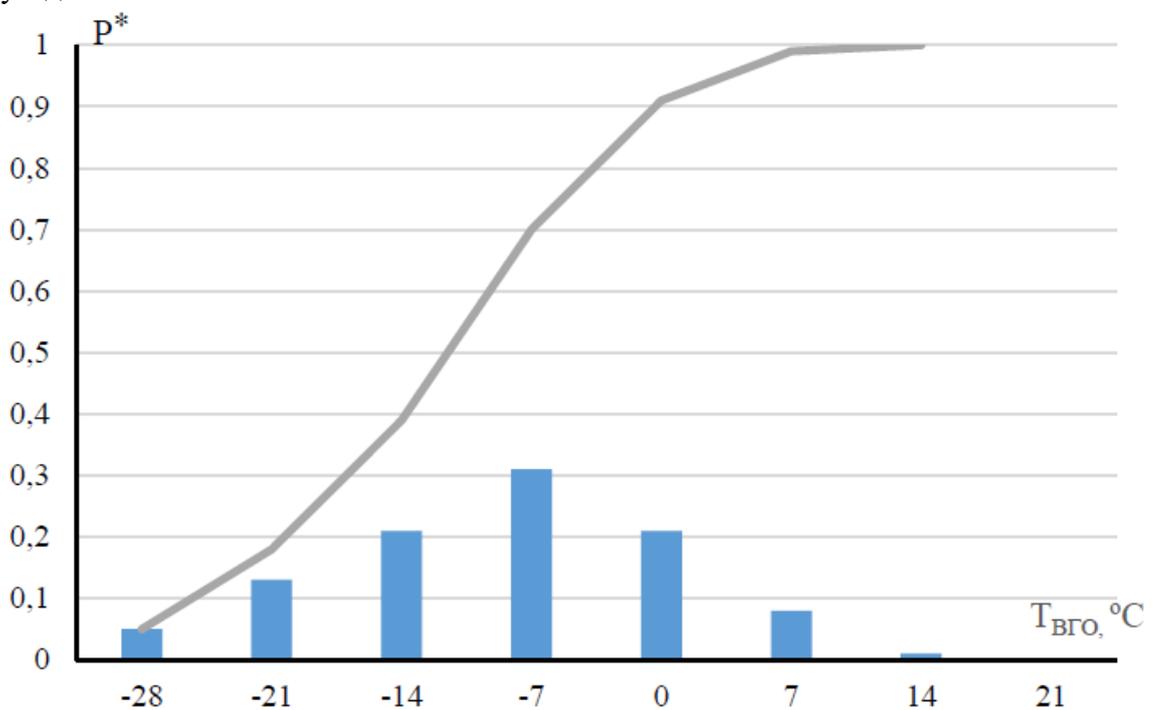


Рисунок 2.10. Гистограмма и кумулята распределения повторяемости температуры воздуха на уровне верхней границы конвективных облаков всех исследуемых форм

В таблице 2.18 приведены данные, характеризующие осредненные значения температуры воздуха на уровне верхней границы облаков всех исследуемых форм по месяцам, за летний период и в среднем за полугодие.

Таблица 2.18

Средние значения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на уровне верхней границы облаков всех исследуемых форм

Месяц	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	лето	полугодие
$T_{\text{ВГО}}$	-11,3	-9,3	-8,9	-7,4	-6,8	-7,8	-7,7	-8,6

В среднем температура воздуха на уровне верхней границы всех конвективных облаков составляет минус $8,6^{\circ}\text{C}$, а в летние месяцы эта величина равна минус $7,7^{\circ}\text{C}$. От апреля к маю температура повышается на $2,0^{\circ}\text{C}$, достигая в августе за счет прогрева нижней тропосферы максимального значения, равного минус $6,8^{\circ}\text{C}$. В сентябре она понижается на $1,0^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим значения температуры воздуха на уровне вершин мощных кучевых облаков, не дававших осадков ко времени проведения зондирования (см. таблицу 2.19).

Таблица 2.19

Средние значения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на уровне вершин мощных кучевых облаков, не дававших осадков

Месяц	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	лето	полугодие
$T_{\text{ВГО}}$	-11,5	-14,1	-15,7	-18,3	-20,1	-18,4	-17,4	-15,9

Из анализа таблицы 2.19 видно, что при прогреве атмосферы среднемесячная температура воздуха на уровне вершин облаков постепенно понижается и достигает минимального значения минус $20,1^{\circ}\text{C}$ в августе. Средняя сезонная температура несколько ниже, чем средняя за полугодие. Это связано с общим прогревом тропосферы к середине августа.

На рисунке 2.11 приведены гистограмма и кумулята распределения температуры на уровне вершин мощных кучевых облаков, не дававших осадков ко времени проведения зондирования.

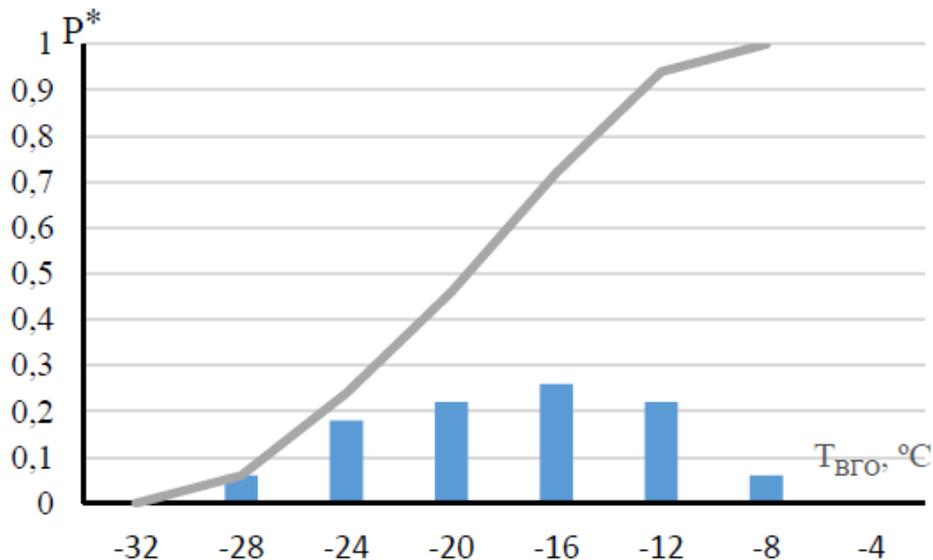


Рисунок 2.11. Гистограмма и кумулята распределения повторяемости температуры воздуха на уровне верхней границы мощных кучевых облаков, не дававших осадков

При сопоставлении гистограмм на рисунках 2.10 и 2.11 отчетливо виден сдвиг значений повторяемости в сторону более низких температур для мощных кучевых

облаков, не дававших осадков, пропорциональный возрастанию вертикальной мощности облаков. В 65% случаев на уровне верхней границы этих облаков температура составляет от минус 12,0 до минус 24,0°C. При этом в 42% случаев вершины Cu cong., не дававших осадков ко времени проведения СЗА, расположены выше изотермы минус 20°C.

Группу облаков Cu cong. необходимо рассматривать отдельно вследствие того, что по фазовой структуре данные облака являются смешанными. Температура воздуха на уровне нижней границы этих облаков обычно составляет 5-10°C. От основания до уровня нулевой изотермы облако состоит из капель воды, а выше, до уровня изотермы минус 20°C – из снежинок и переохлажденных капель воды, которые здесь преобладают; выше уровня изотермы минус 20°C преобладают снежинки и ледяные кристаллы [188].

Таким образом, полученные данные о температуре воздуха на уровне верхней границы конвективных облаков свидетельствуют о возможности получения положительного результата при воздействии на них с целью вызывания искусственных осадков, поскольку они удовлетворяют критерию пригодности.

Другим параметром облаков, входящим в критерий пригодности, является их вертикальная мощность. Ниже представлены данные, относящиеся к этой характеристике конвективных облаков. Так, на рисунке 2.12 приведены гистограмма и кумулята распределения вертикальной мощности конвективных облаков всех исследуемых форм.

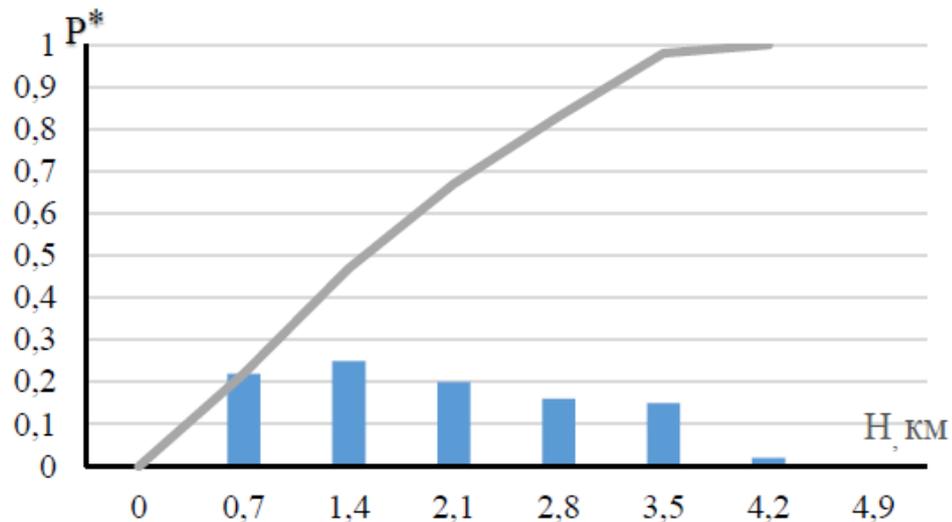


Рисунок 2.12. Гистограмма и кумулята распределения повторяемости вертикальной мощности конвективных облаков всех исследуемых форм

Оказалось, что наиболее часто встречались облака с вертикальной мощностью 1-2 км (45%). Облака Cu cong. мощностью более 2 км наблюдались в 37% случаев. Среднемесячные значения вертикальной мощности конвективных облаков в зависимости от их формы приведены в таблице 2.20.

Таблица 2.20

Среднемесячные значения вертикальной мощности (км) конвективных облаков

Месяц	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	сезон	полугодие
Cu hum.	0,29	0,34	0,39	0,37	0,37	0,38	0,37	0,33
Cu med.	0,85	0,96	0,89	0,92	0,82	0,94	0,86	0,91
Cu cong., не дававшие осадков	3,02	3,84	3,71	3,80	3,00	2,67	3,43	3,05

Из полученных данных следует, что в среднем за полугодие вертикальная мощность облаков Cu hum. составляет 330 м, облаков Cu med. – 910 м. Вертикальная мощность Cu cong. в среднем за летний сезон составила 2,97 км, за полугодие – 2,54 км, а в случае облаков, не дававших осадков, – 3,43 и 3,05 км соответственно.

В среднем вертикальная мощность облаков Cu cong., не дававших осадков, достигает среднего значения 3,84 км в мае.

Следует отметить, что вертикальная мощность облаков Cu cong., образующихся при циклонических условиях, в среднем почти на 500 м больше, чем мощных кучевых облаков, образующихся при антициклонических условиях.

На рисунке 2.13 приводятся гистограмма и кумулята распределения вертикальной мощности облаков Cu cong., не дававших осадков ко времени проведения СЗА.

Как следует из работы [187], облака Cu cong. в среднем повторяемость различных градаций вертикальной мощности существенно различается в зависимости от синоптических условий образования облаков. Над Центральным районом ЕТР в антициклонических условиях конвективные облака вертикальной мощностью до 3,5 км встречаются в 80% случаев, мощностью более 3,5 км – в 20% случаев, в циклонических условиях – в 55 и 45% случаев соответственно.

Значительный интерес для проведения работ по воздействию на конвективные облака вызывают характеристики вертикальной мощности переохлажденной части облаков. Эти данные приводятся в таблице 2.21 для конвективных облаков различных форм.

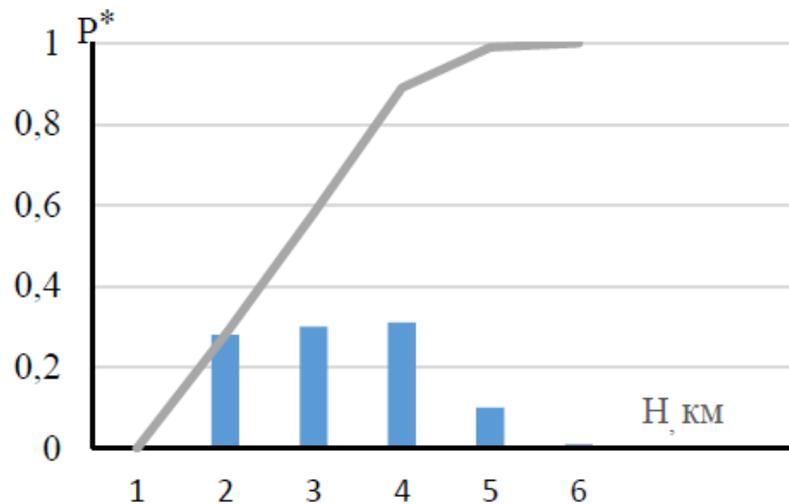


Рисунок 2.13. Гистограмма и кумулята распределения повторяемости толщины конвективных облаков, не дававших осадков

Таблица 2.21

Средние значения вертикальной мощности (км) переохлажденной части конвективных облаков различных форм

Месяц	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	сезон	полугодие
Cu hum.	0,15	0,11	0,09	0,05	0,03	0,12	0,06	0,09
Cu med.	0,74	0,57	0,35	0,33	0,26	0,59	0,32	0,47
Cu cong., не дававшие осадков	2,17	2,65	2,72	2,38	2,43	2,63	2,54	2,49

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что вертикальная мощность переохлажденной части облаков *Cu hum.* в среднем за сезон составляет всего 60 м, за полугодие – 90 м; при этом максимум наблюдается в апреле, а в августе такие облака в большинстве случаев развиваются в слое воздуха ниже нулевой изотермы.

У облаков *Cu med.* переохлажденная часть в среднем за сезон составляет 320 м. Максимум, равный 740 м, наблюдается в апреле, а в августе это значение уменьшается почти втрое.

Наибольшее значение мощности переохлажденной части облаков *Cu cong.*, не дававших осадков, составляет 2,72 км в июне, среднее значение за сезон – 2,54 км, за полугодие – 2,49 км. Однако различия по месяцам у этой группы облаков существенно меньше – около 200-300 м. При циклонических условиях вертикальная мощность переохлажденной части *Cu cong.* на 300-400 м больше, чем при антициклонических [157].

На рисунке 2.14 приведены гистограмма и кумулята повторяемости вертикальной мощности переохлажденной части облаков *Cu cong.*, ($\Delta H_{п.ч.}$), не дававших осадков. Из рисунка 2.14 следует, что в 72% случаев она составляет 1,1-2,5 км. Повторяемость значений $\Delta H_{п.ч.}$ более 2,5 км составляет 19%.

В общем случае в соответствии с физикой процессов осадкообразования, чем больше $\Delta H_{п.ч.}$, тем более вероятно выпадение ливневых осадков из *Cu cong.*

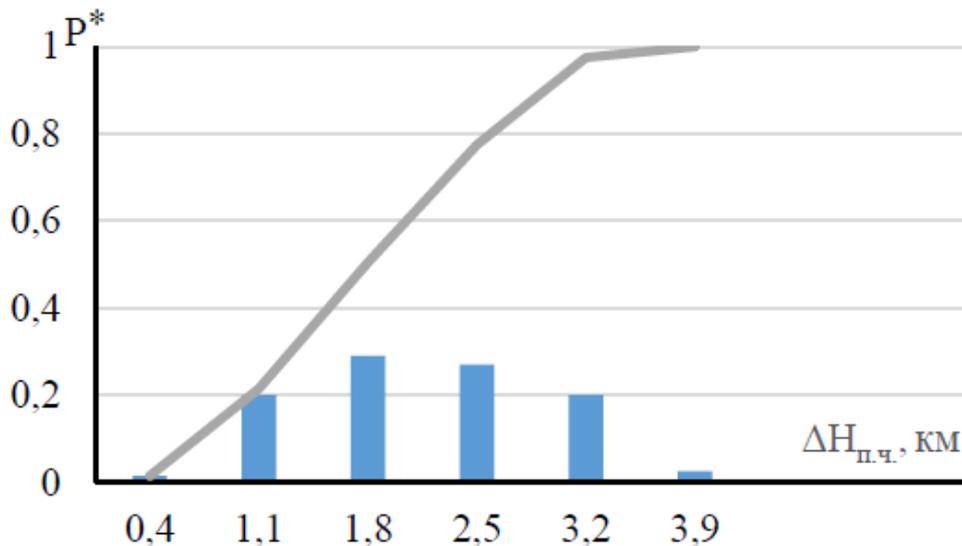


Рисунок 2.14. Гистограмма и кумулята распределения повторяемости мощности переохлажденной части конвективных облаков, не дававших осадков

Синоптические условия, в которых развиваются конвективные облака, оказывают определенное влияние на размеры их переохлажденной части. В среднем облака *Cu cong.* с мощностью переохлажденной части до 1,5 км в 80% случаев развиваются в антициклонических условиях, в 65% случаев – в циклонических [187, 189].

Полученные выше данные о характеристиках конвективных облаков могут быть использованы в дальнейшем для получения количественных оценок пригодности этих облаков к воздействию с целью вызывания искусственных осадков, а также с целью разрушения облаков.

Выводы по 2 главе

Сформирована база данных для исследования характеристик переохлажденной облачности (переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков) применительно к проблеме воздействия на нее на основе обработки материалов самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7м над аэропортом Внуково за 1954-1964 гг. Всего обработано около 6000 (5873) подъемов самолетов-зондировщиков.

Исследованы закономерности распределения характеристик (расслоенность, фазовая структура, водность и водозапас и др.) волнистообразных и слоистообразных облаков на основе их статической обработки. Учитывая специфику решаемой задачи, характеристики облаков рассчитывались для каждого месяца холодного периода с ноября по март, за весь период и за зимний сезон (декабрь-февраль) как для осадконесущих облаков, так и для облаков без осадков.

Показано, что над центральным районом ЕТР в холодное полугодие волнистообразные облака являются, как правило, однослойными. Характерной особенностью фронтальных облачных систем является расслоенность, причем, на фронтах с осадками и без осадков преобладающей является двух и трехслойная облачность. Средняя повторяемость двухслойных осадконесущих облаков в этом период составляет 33,6%, а трехслойных – 29,1%.

Установлено, что в течение всего холодного полугодия в волнистообразных облаках преобладающей является жидко-капельная фаза. При этом, как для слоистых, так и для слоисто-кучевых облаков повторяемость капельной фазы почти одинаковая (около 90%). Фронтальная облачность имеет более сложную фазовую структуру, но и в ней характерной особенностью являются высокие значения повторяемости жидко-капельных N_s облаков, которые для облачных образований с осадками и без осадков составляют 62,3% и 77,5% соответственно.

Рассчитана повторяемость переохлажденных волнистообразных облаков. Полученные данные свидетельствуют о том, что в период с ноября по март волнистообразные облака с осадками и без осадков, как правило, являются переохлажденными. Повторяемость их практически одинакова и достигает 90-92%.

Получены статистические характеристики водности и водозапасов облаков. Показано, что средние значения этих характеристик для слоистых и слоисто-кучевых облаков находятся в пределах 0,16-0,33 г/м³ и 64-158 г/м², средние значения водности слоисто-дождевых и высокослоистых облаков в холодное полугодие составляют 0,22 и 0,16 г/м³, а водозапасов – 260 и 180 г/м².

В работе по материалам самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7м над аэродромом Внуково (г. Москва) за 1953-1964 гг. выполнено исследование характеристик конвективных облаков применительно к проблеме воздействия с целью вызывания искусственных осадков для профилактики возникновения лесных пожаров и борьбы с ними. Показано, что в месяцы теплого полугодия основным объектом воздействия над рассматриваемым районом являются мощно-кучевые облака (Cu cong). Средняя повторяемость таких облаков летом составляет 85%, в теплое полугодие – 75%.

Исследование характеристик конвективных облаков (вертикальная протяженность облаков и переохлажденной их части, температура на верхней границе и фазовая структура облаков) показало, что они могут в ряде случаев удовлетворять требованиям критерия пригодности конвективных облаков к воздействию с целью вызывания осадков.

Получены количественные характеристики пригодности к вызыванию искусственных осадков мощно-кучевых облаков над центральным районом ЕТР, которые в среднем за теплое полугодие составляют 48%.

С учетом наличия в нашей стране средств воздействия на облака и полученных в настоящей работе количественных оценок пригодности к вызыванию искусственных осадков конвективных облаков (в частности, мощно-кучевых облаков) сделан вывод о целесообразности проведения работ по воздействию на конвективные облака в целях профилактики возникновения лесных пожаров и борьбы с ними.

Полученные результаты целесообразно использовать при планировании, подготовке и проведении работ по воздействию на переохлажденные облака в интересах хозяйственных отраслей страны.

3. ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ ОБЛАЧНОСТИ К АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМ РАЙОНОМ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Проведение работ по воздействию на переохлажденные облачные системы (ПОС) неразрывно связано с исследованием вопроса о повторяемости пригодных к засеву облаков различных форм в конкретных ФГР. Такие исследования позволяют провести оценку облачных ресурсов к воздействию с целью вызывания искусственных или интенсифицирования естественных осадков, рассеяния или стабилизации облачного покрова, а также обосновать необходимость и целесообразность проведения подобных мероприятий.

В связи с этим в диссертации приводятся оценки пригодности к засеву переохлажденных волнистообразных и слоистообразных облаков над центральным районом ЕТР с целью вызывания (интенсифицирования) осадков, а также рассеяния облачного покрова. Даются также оценки пригодности конвективных облаков к засеву с целью вызывания искусственных осадков, а также с целью разрушения облачности.

При получении оценок пригодности облаков различных форм к воздействию с определенной целью были использованы критерии, полученные в результате проведения многочисленных натуральных экспериментов. Эти критерии в обобщенном виде приведены на рисунке 3.1 [114-119, 154-157].



Рисунок 3.1. Критерии пригодности к засеву переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков

Ниже приведены результаты исследований, касающиеся оценок пригодности переохлажденной облачности к воздействию над центральным районом ЕТР.

3.1. Оценки пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к рассеянию

Рассеяние облаков над некоторой территорией необходимо при решении целого ряда практических задач: для улучшения погодных условий в районах аэропортов в интересах обеспечения полетов самолетов, увеличения времени естественной освещенности крупных городов, изменения радиационного баланса на больших площадях с целью изменения климата и т.д. [190-194]. При планировании регулярных работ по рассеянию облаков в каком-либо районе, а также для оценки их экономической целесообразности необходимо знать ресурс облаков в этом районе, т.е. иметь данные о пригодности облаков различных форм к рассеянию.

Анализ работ по этому вопросу показывает, что такие оценки выполнены, главным образом, для районов Украины [154-156]. Имеется также ряд работ, посвященных оценке ресурсов облаков, пригодных для рассеяния на ЕТР [195-198]. Однако, эти исследования не относятся к рассматриваемому в диссертации району. Исходя из этого, на рисунке 3.2 приведены данные, характеризующие пригодность ВОБЛ к рассеянию.

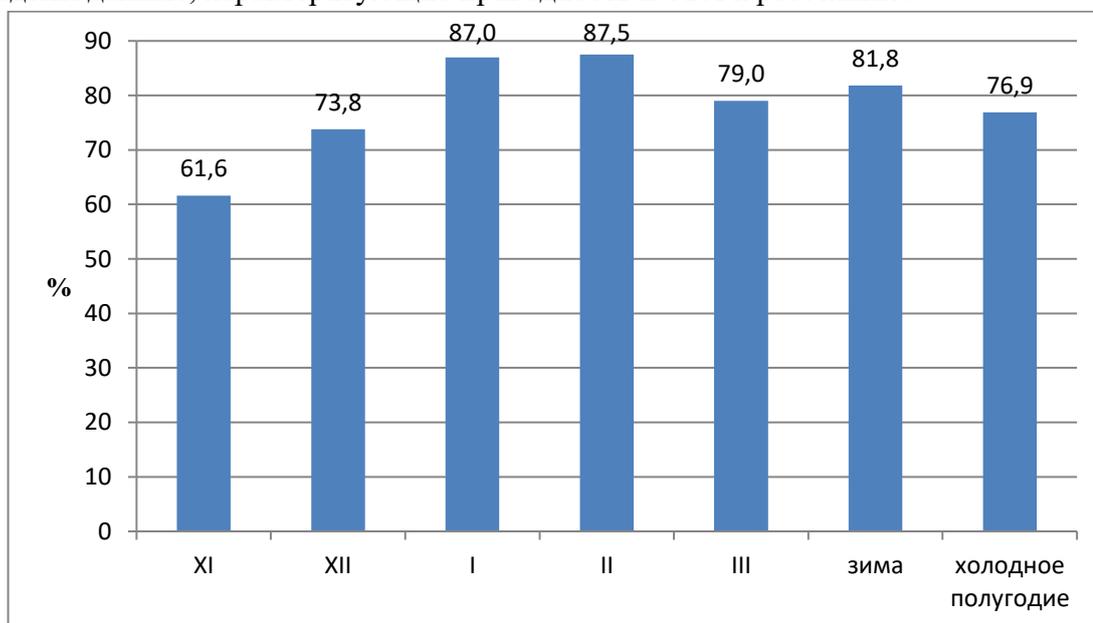


Рисунок 3.2. Повторяемость (%) пригодных к рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков

Приведенные на рисунке 3.2 (а также и на рисунке 3.3) оценки пригодности переохлажденных ВОБЛ к рассеянию получены в результате обработки материалов СЗА ТАЭ-7,7м над аэропортом Внуково за 1953-1964 гг. с использованием критерия пригодности, упомянутого выше. Случаи с многослойной облачностью, когда один слой был пригоден к рассеянию, а другой (другие) нет, из рассмотрения исключались.

Согласно приведенным на рисунке 3.2 данным, наиболее часто пригодные к рассеянию ВОБЛ наблюдаются в январе (87,0%) и феврале (87,5%); значительно реже в ноябре (61,6%). В декабре и марте значения повторяемости пригодных к рассеянию ВОБЛ вновь увеличиваются, достигая значений 73,8 и 79,0% соответственно. В целом ВОБЛ пригодны к засеву с целью рассеяния зимой в 81,8% случаев, в холодное полугодие – в 76,9% случаев.

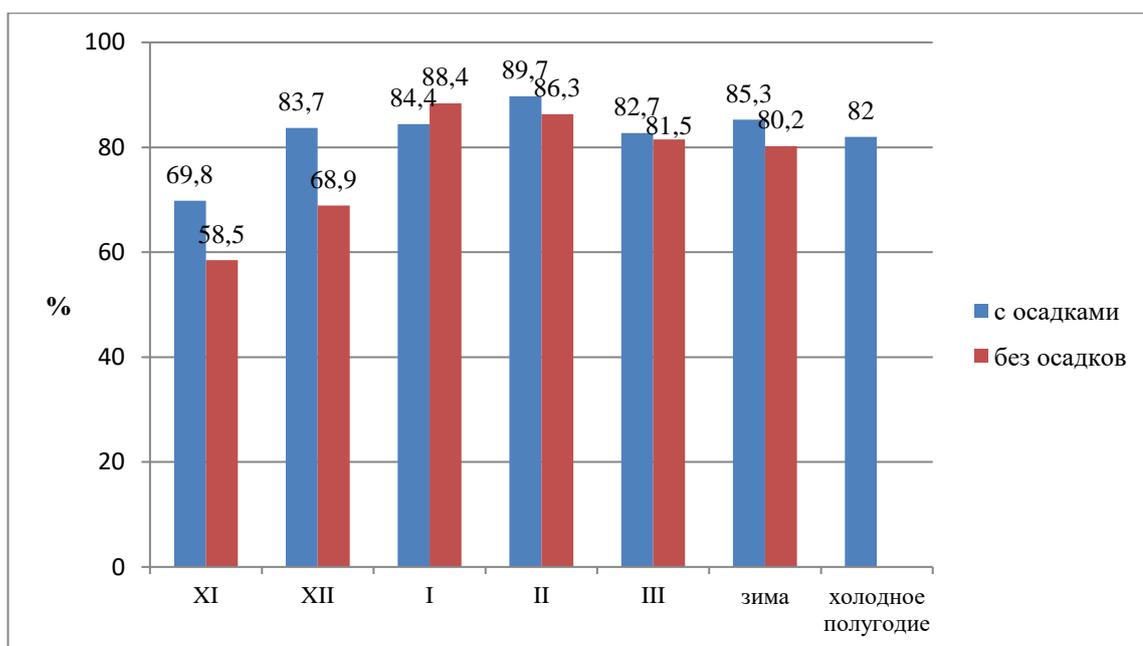


Рисунок 3.3. Повторяемость (%) пригодных к рассеянию ВСО с осадками и без осадков

Представленные на рисунке 3.2 результаты обработки данных относятся к ВОБЛ без разделения на облака с осадками и без осадков. Вместе с тем, в ряде случаев необходимо иметь сведения о пригодности ВОБЛ как с осадками, так и без осадков. Поэтому на рисунке 3.3 приведены данные о пригодности ВОБЛ к рассеянию с разделением их на указанные признаки. Так как мощность и влагогенерирующая способность ВОБЛ с осадками невелика, то можно допустить, что засев таких облаков может привести к их рассеянию.

Можно видеть, что наиболее часто пригодные к рассеянию ВОБЛ с осадками и без осадков наблюдаются в январе (84,4 и 88,4%) и феврале (89,7 и 86,3%). Менее всего они пригодны к засеву в ноябре (69,8 и 58,5% соответственно). В целом же за зиму и холодное полугодие величины повторяемости пригодных к рассеянию ВОБЛ с осадками и без осадков остаются довольно высокими (85,3 и 80,2%; 82,0 и 75,2% соответственно).

Следует заметить, что практически во все месяцы холодного полугодия (за исключением января) чаще бывают пригодны к рассеянию ВОБЛ с осадками. При этом разность в показателях пригодности ВОБЛ с осадками и без осадков может достигать десяти процентов.

Приведенные выше результаты могут явиться основой для разработки методики прогноза пригодности переохлажденных ВОБЛ в холодное полугодие (и, особенно, зимой) над ЦР ЕТР.

При планировании и проведении работ по рассеянию ВОБЛ очень важно знать, сколько облачных слоев необходимо рассеять. Так как ВОБЛ могут быть расслоенными, то возникает необходимость в получении данных о количестве слоев, одновременно пригодных для рассеяния. Результаты такой обработки приведены в таблице Г.1 Приложения Г.

Из анализа данных этой таблицы следует, что для ВОБЛ как с осадками, так и без них присуще преобладание одного слоя, пригодного для рассеяния. Следует отметить, что эта тенденция наиболее четко выражена в отношении ВОБЛ без осадков. Во все месяцы

холодного полугодия повторяемость пригодного к рассеянию одного слоя превышает 60,0% случаев, достигая 70,3% в ноябре и 70,6% в феврале.

Для ВОБЛ с осадками величина повторяемости таких условий меньше. Так, например, в январе и феврале повторяемость пригодных к рассеянию однослойных облаков не превышает 48,5 и 47,2% соответственно. Поэтому при засеве ВОБЛ с осадками необходимо принимать во внимание тот факт, что почти в половине случаев для получения положительного эффекта необходимо рассеивать два-три слоя облаков.

Приведенные данные о пригодности к рассеянию ВОБЛ относятся к случаям использования в качестве химического реагента твердой углекислоты. Вместе с тем, в последние годы предпринимаются попытки рассеяния слоистообразной облачности со средней температурой облачного слоя выше минус 3°C. Натурные эксперименты по засеву таких облаков с помощью твердой углекислоты дали положительные результаты [199, 200]. Однако в этом случае необходимо существенное увеличение (в несколько раз) количества химического реагента. Более убедительные опыты по рассеянию облачных слоев с такой температурой были получены при использовании в качестве реагента жидкого пропана, верхний предел применимости которого равен минус 1°C [201, 202].

Актуальность работ по засеву ПОС и туманов со средней температурой слоя выше минус 3°C объясняется тем, что никакие другие реагенты, включая и гигроскопические, не обеспечивают достижение целевого эффекта [203]. Весьма существенным является и тот факт, что повторяемость таких облаков и туманов в ряде районов нашей страны в определенные месяцы значительна.

В связи с возможностью применения для рассеяния переохлажденных ВОБЛ жидкого пропана возникает необходимость в получении данных о повторяемости условий, благоприятных для засева облачных слоев, имеющих среднюю температуру от минус 1 до минус 3°C. Проведение такой работы – предмет самостоятельных исследований.

Следует отметить, что полученные в диссертации оценки пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к рассеянию могут быть также использованы и в качестве оценок пригодности этих облаков к воздействию с целью их стабилизации. Достижение второй цели воздействия может быть осуществлено за счет увеличения норм расхода применяемых химических реагентов (в частности, твердой углекислоты). Иными словами осуществляется перезасев переохлажденных волнистообразных облаков.

3.2. Оценки пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к вызыванию осадков

В настоящее время в литературе имеется ряд работ, содержащих сведения о повторяемости пригодных к вызыванию осадков ВОБЛ в основном применительно к районам Украины [154, 156], Средней Азии [166, 204] и Казахстана [205]. Вместе с тем, в отношении ЦР ЕТР аналогичные данные практически отсутствуют. Исключение составляют исследования, выполненные Кондратовой А.В. [206]. В этой работе приведены оценки водозапасов переохлажденных облаков слоистых форм, не дающих осадков, и сведения о возможном количестве дополнительных осадков. Однако, в статье отсутствует методика подсчета числа дней с облаками, пригодными к засеву. Иными

словами, в работе нет обоснованных оценок пригодности ВОБЛ к засеву с целью вызывания осадков. Кроме того, в приводимых в работе расчетах принималось, что все опыты по засеву облаков, минимальная температура которых не выше минус 1°C, дают положительный эффект, т.е. такие облака полностью рассеиваются, и вся имеющаяся в них влага достигает земли. Это допущение вряд ли можно считать корректным, так как оно приводит к завышенным оценкам.

С учетом вышеизложенного, на рисунке 3.4 приведены результаты обработки материалов СЗА, характеризующие пригодность ВОБЛ к вызыванию осадков над рассматриваемым районом, полученные на основании критерия, приведенного выше.

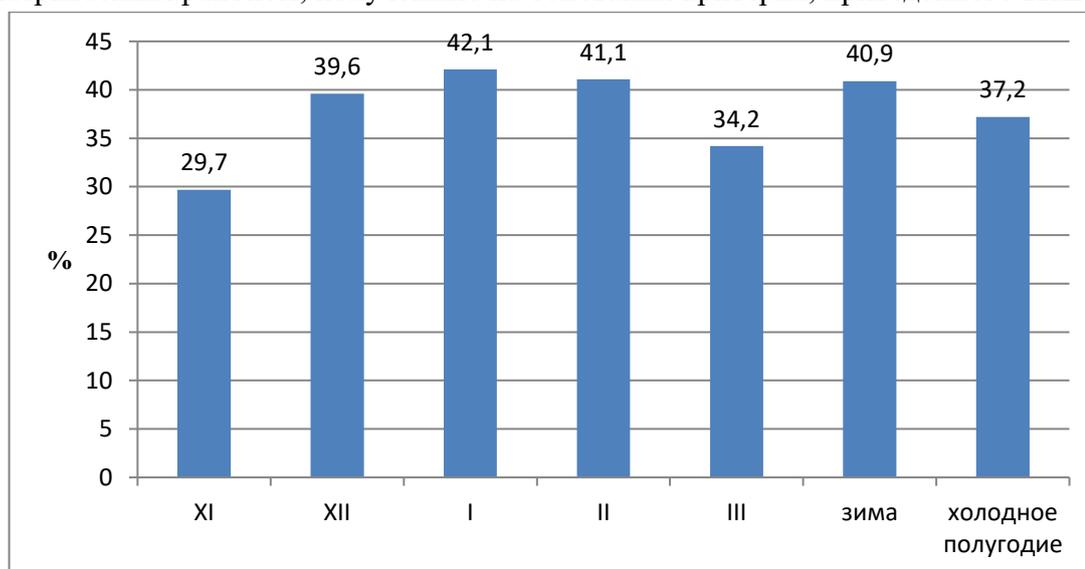


Рисунок 3.4. Повторяемость (%) пригодных к вызыванию осадков переохлажденных волнистообразных облаков

Из анализа приведенных на рисунке 3.4 данных видно, что повторяемость пригодных к засеву ВОБЛ с целью вызывания искусственных осадков изменяется в зависимости от месяца в пределах от 29,7 до 42,1%. При этом наиболее часто пригодные к воздействию облака наблюдаются в январе и феврале (42,1% и 41,1% соответственно). В марте и ноябре значения повторяемости пригодных к воздействию таких облаков меньше и составляют 34,2% и 29,7% соответственно.

В целом же зимой и в холодное полугодие пригодные к вызыванию осадков ВОБЛ наблюдаются в 40,9% и 37,2% случаев. Увеличение повторяемости пригодных к засеву ВОБЛ в январе-феврале и понижение в марте и ноябре объясняются в значительной мере температурным фоном облачных слоев.

Поскольку ВОБЛ по фазовому строению почти всегда пригодны к засеву, то, по-видимому, значительный процент непригодности этих облаков к вызыванию осадков обусловлен либо их температурой, либо малой мощностью. Однако этот вопрос требует проведения дополнительных исследований.

Представленные на рисунке 3.4 данные о повторяемости пригодных к вызыванию осадков ВОБЛ относятся к облачным слоям с ВНГО не более 1000 м. Вместе с тем, согласно [207], довольно часто искусственные осадки достигали поверхности земли и при засеве облаков с ВНГО не более 1500 и 2000 м. С учетом этого обстоятельства на рисунке 3.5 приведены результаты исследований, характеризующие пригодность к вызыванию осадков ВОБЛ не только с ВНГО менее 1000 м, но и не превышающей 1500 и 2000 м.

Повторяемость пригодных к засеву облаков при этом увеличивается для всех месяцев холодного полугодия. Так, в январе это увеличение составляет 8,8%, в марте – 10,9%, в феврале – 6,9%. Зимой и в холодное полугодие величины этого прироста равны 8,2% и 8,4% соответственно. Такие образом, учет ВНГО волнистообразных облаков приводит к тому, что пригодные к засеву облака зимой и в холодное полугодие наблюдаются почти в половине случаев.

При засеве облаков с ВНГО более 1000 м вероятность достижения осадками поверхности земли возрастает, если ниже расположен еще один или несколько облачных слоев, а межоблачные прослойки невелики. Количество осадков в этом случае может увеличиваться за счет вымывания влаги нижних слоев. Однако, как показали расчеты, повторяемость таких условий в холодное полугодие мала. Так, для ЦР ЕТР повторяемость их составляет всего несколько процентов.

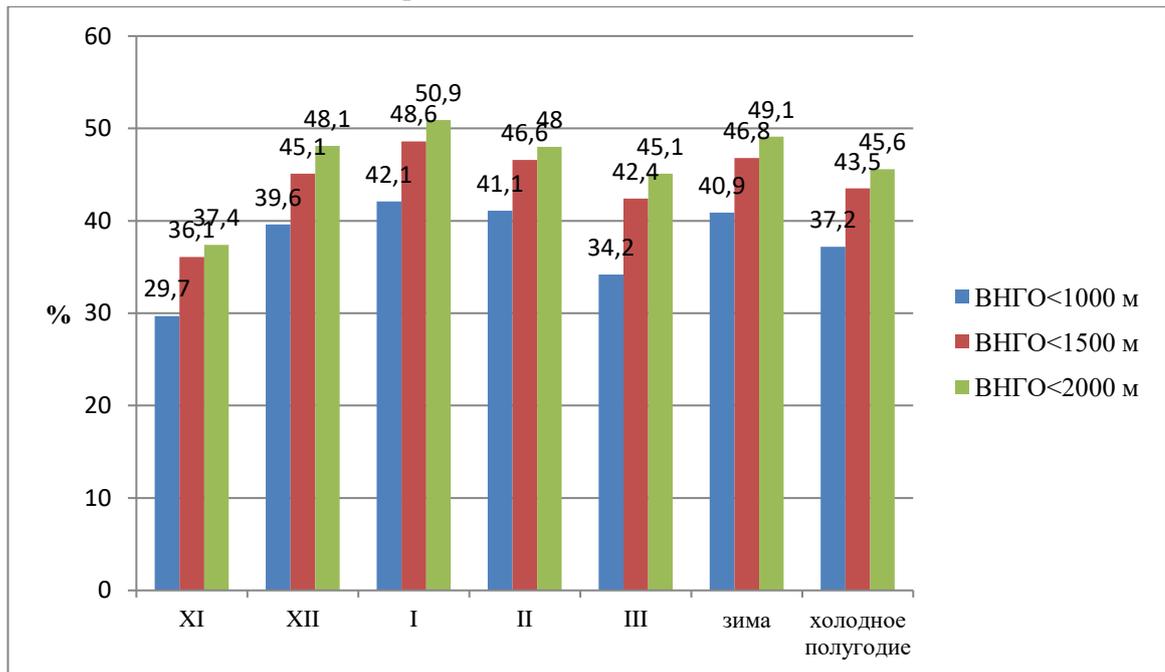


Рисунок 3.5. Повторяемость (%) пригодных к вызыванию осадков переохлажденных волнистообразных облаков

Полученные оценки свидетельствуют о том, что пригодные к вызыванию осадков ВОБЛ в подавляющем большинстве случаев являются однослойными, что подтверждается данными, представленными в таблице Г.2 Приложения Г. Пригодность к засеву одного слоя ВОБЛ независимо от ВНГО в холодное полугодие составляет 94,2% случаев, изменяясь от месяца к месяцу в пределах 89,4-97,1%. Повторяемость пригодных к вызыванию осадков одновременно двух слоев крайне мала и не превышает в холодное полугодие 6%. Отмеченные тенденции справедливы как для слоев с ВНГО не более 1500 м, так и слоев с ВНГО не более 2500 м. Преобладание повторяемости пригодности к засеву только одного слоя в значительной мере определяется характером расслоенности таких облаков (см. п. 2.1).

Приведенные выше результаты исследований могут быть использованы при планировании и проведении работ по засеву ВОБЛ с целью вызывания осадков для накопления запасов снега в холодное полугодие. Эти данные необходимы также при решении вопроса о перераспределении осадков над заданными районами. Более того, при перезасеве ВОБЛ, не дающих осадков, может быть решена задача стабилизации облачного

покрова, позволяющая осуществить ряд таких мероприятий, как, например, изменение температурного режима над крупными городами для снижения расхода топлива на обогрев городских сооружений.

3.3. Оценки пригодности переохлажденных слоистообразных облаков к вызыванию (интенсифицированию) осадков и рассеянию облачного покрова

Практика работ по воздействиям на СОБЛ показала, что основными целями при этом являются вызывание искусственных и интенсифицирование естественных осадков [154, 156]. Вместе с тем, в последние годы появились сведения о возможности рассеяния фронтальных облачных слоев [208-210]. В связи с этим ниже представлены результаты исследования, касающиеся получения количественных оценок воздействия на переохлажденные СОБЛ с различными целями.

3.3.1. Оценки пригодности переохлажденных слоистообразных облаков к вызыванию осадков

Наряду с ВОБЛ, другим возможным источником дополнительных осадков могут служить СОБЛ, не дающие осадков в естественных условиях. Несмотря на то, что в холодное полугодие в умеренных широтах СОБЛ, как правило, являются осадконесущими, тем не менее, наблюдаются ситуации, при которых осадки из облаков таких форм не выпадают [100].

В связи с этим представляется целесообразным получение данных о повторяемости пригодных к вызыванию осадков СОБЛ. Результаты такого исследования приведены на рисунке 3.6.

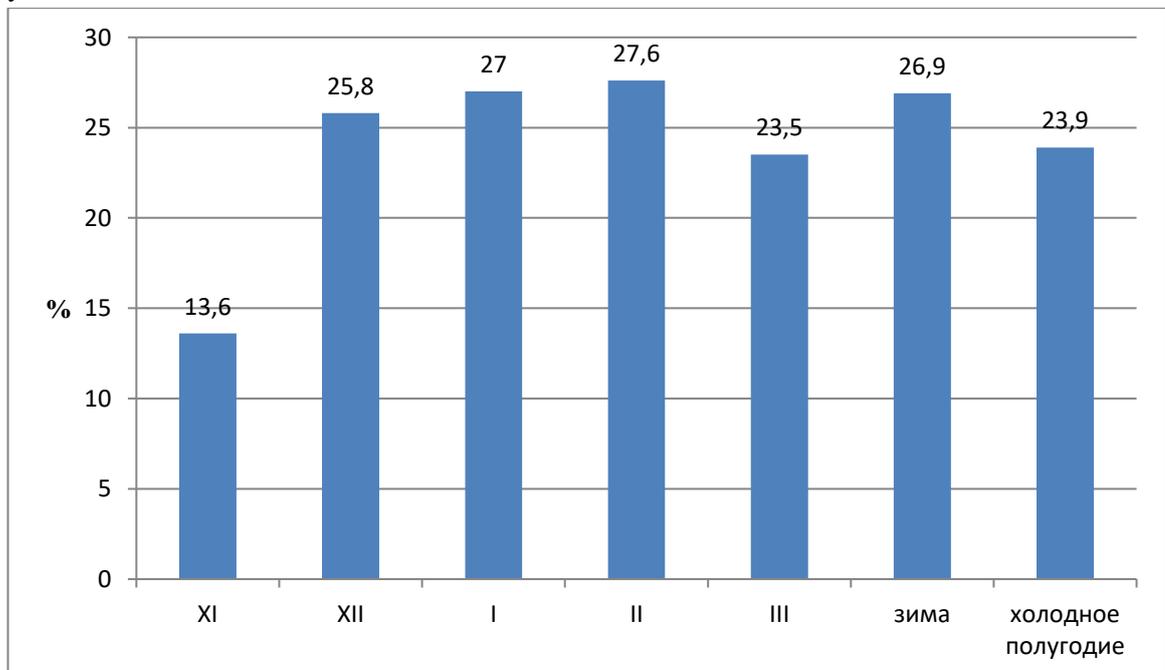


Рисунок 3.6. Повторяемость (%) пригодных к вызыванию осадков переохлажденных слоистообразных облаков с ВНГО ≤ 1000 м

Приведенные на этом рисунке (а также и на рисунке 3.11) данные о пригодности СОБЛ к вызыванию осадков получены при использовании критерия, приведенного выше.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что пригодные к вызыванию осадков СОБЛ в холодное полугодие над ЦР ЕТР наблюдаются не часто. Так, зимой и в холодное полугодие повторяемость таких облаков составляет не более 30,0% (26,9 и 23,9% соответственно). Реже всего пригодные к засеву СОБЛ отмечаются в ноябре (13,6%).

Полученные оценки указывают на необходимость тщательного исследования причин, обуславливающих непригодность к засеву ФСО. Проведение такой работы необходимо, прежде всего, для определения облачных ресурсов с точки зрения воздействия на них над конкретными ФГР. Применительно к вышеприведенным данным, можно, по-видимому, предположить, что столь невысокие значения повторяемости пригодности СОБЛ к засеву связаны с высотой их нижней границы, температурным режимом и фазовым строением. Однако, получение количественных оценок этих показателей требует проведение дополнительных исследований.

Если считать, что осадки достигают поверхности земли и при засеве облаков с ВНГО не более 1500 м и 2000 м (что наиболее вероятно в холодное полугодие) то, согласно данным рисунка 3.7, значения повторяемости пригодных к воздействию СОБЛ должны увеличиваться. Для зимы и холодного полугодия это увеличение составит 8,0 и 6,7% случаев соответственно. Наибольший прирост должен наблюдаться в декабре (13,0%), а наименьший – в январе (3,2%).

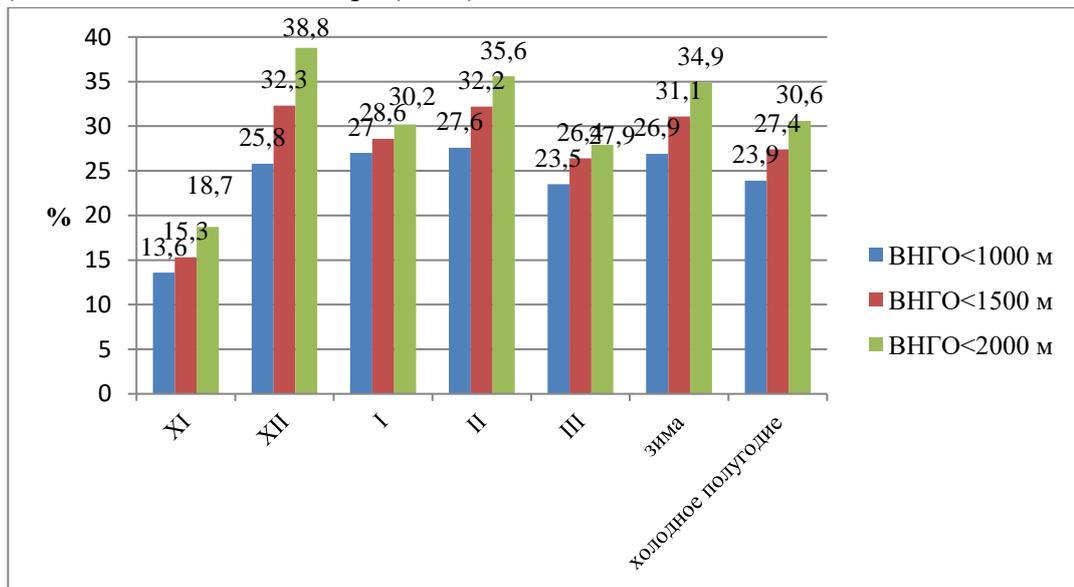


Рисунок 3.7. Повторяемость (%) пригодных к вызыванию осадков переохлажденных слоистообразных облаков

Изучение вопроса о повторяемости числа облачных слоев, пригодных к засеву, показало, что, как правило, пригодным является один слой (таблица Г.3 Приложения Г). Для СОБЛ с ВНГО не более 1000 м, составляющих основную часть фронтальных облаков без осадков, повторяемость пригодного к вызыванию осадков одного слоя составляет 87,7% в холодное полугодие, и 84,2% – зимой. Число случаев, когда пригодными к засеву являются одновременно два слоя, невелико и, за исключением января (23,5%), не превышает 20,0%.

Слоистообразные облака с ВНГО не более 1500 м и 2000 м, как правило, имеют всего по одному пригодному к засеву слою.

Полученные в работе данные о повторяемости пригодных к вызыванию осадков СОБЛ предполагается использовать для расчета дополнительного количества осадков при воздействии на такие облака.

3.3.2. Оценки пригодности переохлажденных слоистообразных облаков к интенсифицированию осадков

Известно, что в умеренных широтах основное количество осадков в течение года (за исключением летнего периода) выпадает из СОБЛ. Облака этих форм являются также основным источником дополнительных осадков и при засеве. Анализ результатов натуральных экспериментов по воздействию на СОБЛ с целью интенсифицирования осадков, приведенный в ряде работ [211-213], показал, что за зоной усиленных осадков отмечаются районы, где их количество значительно меньше, то есть отмечается наличие «тени» осадков. С учетом этого обстоятельства представляется возможным, в зависимости от цели засева, путем выбора необходимого рубежа засева либо увеличивать количество осадков (например, в интересах сельского хозяйства), либо, напротив, уменьшать их (например, для защиты крупных городов, аэропортов, железнодорожных узлов от заносов). Более того, путем перезасева облачных слоев имеется реальная возможность исключить выпадение осадков над нужными территориями. Технически эта задача вполне сегодня осуществима. Однако, в этом случае значительно возрастает расход реагента.

Решение задачи регулирования осадков из СОБЛ неразрывно связано как с исследованием вертикальной и микрофизической структурой облачных слоев, так и с проведением оценок по пригодности облачности к засеву. Исходя из этого, на рисунке 3.8 приведены данные о повторяемости пригодных к интенсифицированию осадков СОБЛ над ЦР ЕТР. Анализ полученных данных позволяет констатировать следующее. Зимой и в холодное полугодие значения повторяемости пригодных к засеву СОБЛ составляют почти 60% (59,6 и 59,0% соответственно). Как и в предыдущих случаях, менее всего СОБЛ пригодны к интенсифицированию осадков в ноябре (50,0%). В остальные месяцы пригодные к засеву облака наблюдаются чаще, и их повторяемость составляет в декабре 57,5%, январе – 59,3%, феврале – 62,5% и марте – 63,8%.

Полученные оценки пригодности СОБЛ к засеву с учетом ВНГО облачных слоев (рисунок 3.9) показали, что чаще всего встречаются облака с ВНГО не более 1000 м. На долю таких облаков зимой и в холодное полугодие приходится 44,0 и 44,1% соответственно. При этом в половине случаев такие облака встречаются в феврале (50,7%) и марте (50,4%). В другие месяцы повторяемость СОБЛ с такой границей облаков, пригодных к засеву, понижается и составляет 42,0% в январе, 40,4 в декабре и только 36,5% в ноябре.

Пригодные к засеву СОБЛ с ВНГО более 1000 м (1000÷1500 м) и 1500 (1500÷2000 м) довольно редки. Например, суммарная повторяемость таких облаков зимой составляет 15,6% в холодное полугодие – 14,9%.

Полученные выше данные позволяют сделать вывод о том, что, поскольку основная часть СОБЛ, пригодных к засеву, имеет ВНГО не более 1000 м, осадки из засеянных слоев будут достигать поверхности земли.

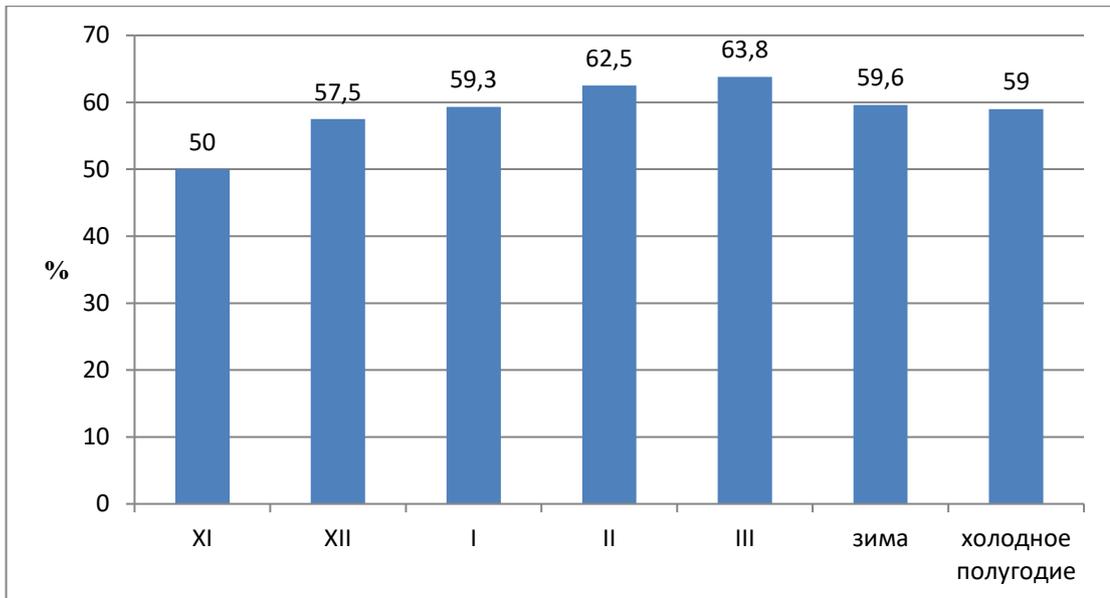


Рисунок 3.8. Повторяемость (%) пригодных к интенсификации осадков переохлажденных слоистообразных облаков

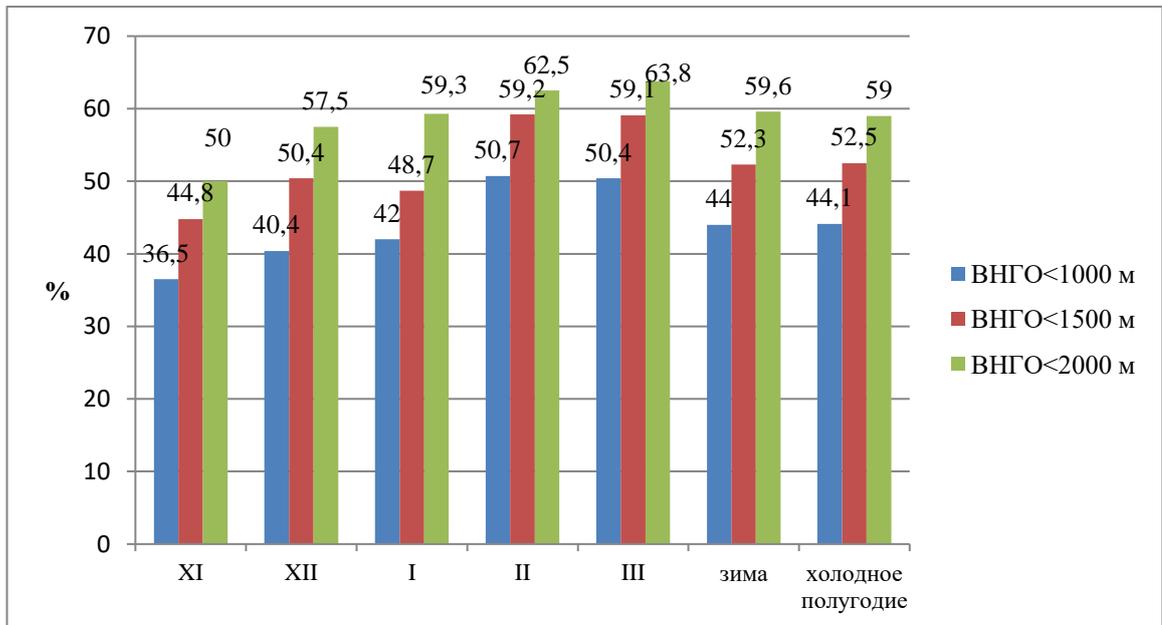


Рисунок 3.9. Повторяемость (%) пригодных к интенсификации осадков переохлажденных слоистообразных облаков

Несмотря на то, что повторяемость пригодных к засеву СОБЛ довольно значительна, тем не менее представляется, что количество таких облаков значительно больше. В самом деле, твердая углекислота предполагает введение ее в слои капельного и смешанного строения. Однако, как показано в п. 2.2 диссертации, фронтальные облака имеют гораздо более сложную структуру (выделено 9 типов фазового строения СОБЛ). Вместе с тем, согласно данным работ [214, 215], при использовании в качестве реагента йодистого серебра возможен засев облаков не только капельного и смешанного строения, но и облачности с более сложной фазовой структурой. Поэтому, не исключено, что проведение оценок пригодности ФСО к засеву при использовании йодистого серебра приведет к увеличению повторяемости пригодных к интенсификации облачных

слоев. Однако решение этого вопроса, несомненно, требует проведения дополнительных самостоятельных исследований.

Оценка числа облачных слоев, одновременно пригодных к засеву для интенсифицирования осадков, показала, что в основном пригодным является один слой (таблица Г.4 Приложения Г). Так, для СОБЛ с ВНГО не более 1000 м повторяемость пригодности к засеву одного слоя составляет зимой 88,4%, в холодное полугодие – 90,4%. Практически во все месяцы холодного полугодия повторяемость пригодности одного слоя к интенсифицированию осадков превышает 85,0%, достигая в марте 96,9%.

Слоистообразные облака с ВНГО не более 1500 м и 2000 м также имеют в подавляющем большинстве случаев один пригодный к засеву слой.

Данные о повторяемости пригодных к интенсифицированию осадков СОБЛ и числе облачных слоев, одновременно пригодных к засеву, входят (наряду с другими характеристиками облачности) в формулы для расчета количества дополнительных осадков (см. п. 4.4). Помимо этих данных, необходимы также сведения о мощности пригодных к интенсифицированию облачных слоев. Эти данные приведены в таблице Г.4 Приложения Г.

3.3.3. Оценки пригодности переохлажденных слоистообразных облаков к рассеянию

Многочисленные эксперименты в нашей стране и за рубежом по засеву ВОБЛ убедительно показали возможность их рассеяния. Однако в последние годы стали проводиться работы с целью изучения возможности рассеяния также и фронтальных облаков. В частности, в экспериментах Украинского НИГМИ положительные результаты были получены при засеве СОБЛ мощностью до 1000 м и более [208, 209, 216]. В качестве реагента использовалась твердая углекислота. В зарубежных экспериментах при использовании пиропатронов на основе йодистого серебра мощность рассеяния слоистообразных облаков уже составляет почти полтора километра [210].

С учетом вышеизложенного возникает необходимость в получении данных о повторяемости пригодных к рассеянию СОБЛ. Полученные оценки по этому вопросу для центрального района ЕТР приведены на рисунке 3.10.

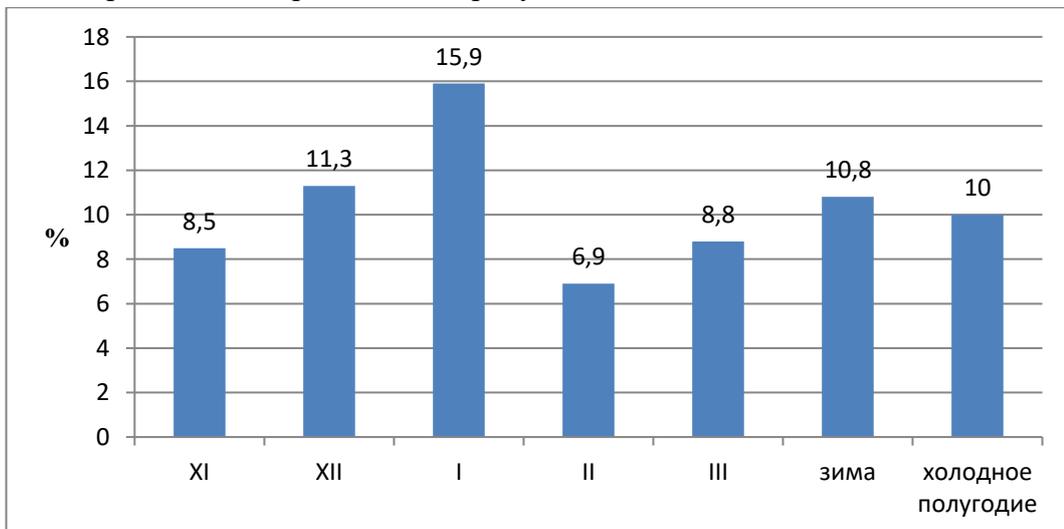


Рисунок 3.10. Повторяемость (%) пригодных к рассеянию переохлажденных слоистообразных облаков без осадков

Поскольку СОБЛ присуще большая влагонегенерирующая способность, то можно ожидать, что засев осадконесущих фронтальных облаков вряд ли приведет к достижению положительного результата. Поэтому выполненные в диссертационной работе оценки относятся только лишь в СОБЛ без осадков. Из анализа данных, представленных на рисунке 3.10 следует, что повторяемость пригодных к рассеянию СОБЛ невелика и составляет всего 10,8% зимой и 10,0% в холодное полугодие. Наиболее часто пригодные к засеву СОБЛ наблюдаются в январе (15,9%) и декабре (11,3%). В остальные месяцы холодного полугодия пригодные к рассеянию облака отмечаются реже. Повторяемость таких СОБЛ составляет в марте 8,8%, ноябре – 8,5%, понижаясь до 6,9% в феврале.

Столь незначительные величины повторяемости пригодных к рассеянию СОБЛ, скорее всего связаны со сложной фазовой структурой облаков, их мощностью. Кроме того, согласно принятой методике в выборку включены только случаи, когда пригодными были к рассеянию все облачные слои. Если же один или несколько слоев были не пригодны, то этот случай зондирования из рассмотрения исключался. В то же время, как показано в п. 2.1 диссертации, именно СОБЛ без осадков присуща значительная расслоенность.

Изучение вопроса о числе слоев, одновременно пригодных к рассеянию, показало, что в отличие от ВОБЛ пригодными к рассеянию могут быть одновременно несколько слоев (таблица Г.5 Приложения Г). При этом картина меняется существенно от месяца к месяцу. Например, в ноябре чаще всего пригодным к рассеянию является один слой (66,7%), а в январе уже три слоя (60,0%). В то же время в декабре пригодными к рассеянию являются два и три слоя одновременно (57,1 и 42,9%).

Полученные выше данные указывают на то, что задача рассеяния СОБЛ, в отличие от ВОБЛ является достаточно сложной, поскольку необходимо рассеивать не один, а несколько слоев. Эти данные также нужны при планировании и проведении работ по воздействию на СОБЛ с целью их рассеяния, поскольку облака такого типа весьма часты осенью и зимой в центральных районах ЕТР.

3.4. Оценки пригодности переохлажденных конвективных облаков к вызыванию искусственных осадков

В результате многолетних экспериментальных исследований, проведенных в Укр. НИГМИ и ЦАО по вопросам воздействия на конвективные облака, были выработаны критерии пригодности их для воздействия. Оказалось, что достижение положительного результата возможно не всегда, а только при вполне определенных параметрах облаков, к числу которых относятся следующие [157]:

1. Толщина облаков – не менее 2 км;
2. Температура на их верхней границе – не выше минус 5°С;
3. Фазовое состояние облаков – капельное или смешанное.

При этом с вероятностью более 80% могут быть получены осадки интенсивностью 0,25 и более мм/мин.

Приведем пояснения, раскрывающие содержательную сторону данных критериальных значений.

В средних широтах чаще всего осадки выпадают из облаков смешанного фазового состояния. Это объясняется тем, что чисто водяные (теплые) облака здесь встречаются

довольно редко; повторяемость случаев выпадения осадков из теплых облаков возрастает с приближением к тропической зоне. Осадки из облаков смешанного строения (с участием твердой фазы) образуются легче и при меньшей толщине облаков [100].

В основе проведения мероприятий по воздействию на КОБЛ с целью вызывания осадков лежит идея о возможности направленного вмешательства в процессы конденсационного роста отдельных облачных элементов за счет создания в облаках достаточного количества ядер кристаллизации. Первым важным условием осадкообразования является наличие в облаках твердой фазы для стимулирования процесса конденсации.

Вторым не менее важным фактором здесь является коагуляционный рост кристалла до размеров дождевой капли на пути его падения сквозь облако. Согласно [100], при радиусе частицы $r < 30$ мкм ее рост осуществляется в основном за счет конденсации водяного пара, а при больших радиусах – в основном за счет коагуляции. С учетом обоих процессов, ледяная частица, начиная падение с вершины облака, может вырасти до размеров дождевой капли $d \geq 2$ мм, пройдя при этом за несколько минут путь в 2 км.

Для искусственного создания льдообразующих ядер (ЛОЯ) в переохлажденных облаках в настоящее время существуют два метода [4-6]:

- 1) введение в вершину облака хладореагентов с целью генерации дополнительных ЛОЯ;
- 2) введение в облако веществ, на которых происходит сублимация водяного пара, и структура кристаллической решетки которых изоморфна (геометрически подобна) структуре решетки кристаллов льда.

Большинство из используемых в практике работ по воздействию на конвективные облака химических реагентов имеют температурный порог срабатывания минус 5°C .

В диссертации получены оценки пригодности КОБЛ для воздействия над ЦР ЕТР.

Конвективные облака, параметры которых удовлетворяли названным критериальным значениям, считались пригодными для воздействия.

Как следует из данных, приведенных на рисунке 3.11, в среднем за теплое полугодие конвективные облака пригодны для воздействия в 48% случаев. Максимум повторяемости 55% наблюдается в мае, минимум 32% – в сентябре.

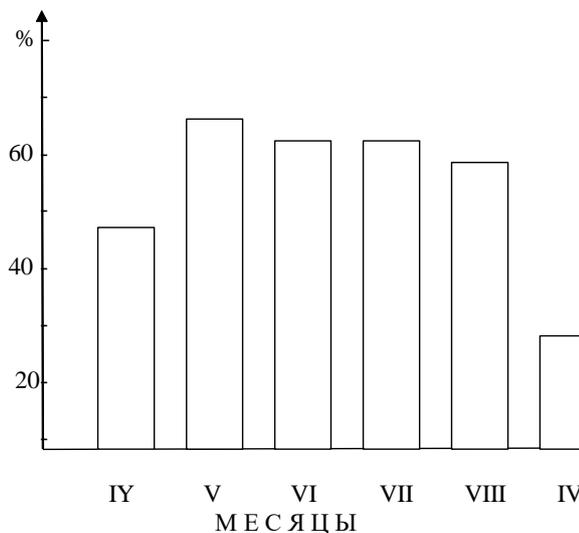


Рисунок 3.11. – Повторяемость конвективных облаков пригодных для вызывания осадков над центральным районом ЕТР

Такое распределение повторяемостей можно объяснить тем, что в среднем тропосфера более прогрета в августе, нежели в мае. К примеру, для одинаковых по толщине облаков температура на их верхней границе в августе, в отличие от мая, не достигает критериального значения и составляет минус 2 ÷ минус 4°С.

Приведенные цифры свидетельствуют о том, что методы и средства воздействия на конвективные облака целесообразно применять при решении широкого круга прикладных задач, перечень которых приведен в Приложении Б (рисунок Б.2).

Следует отметить, что метод вызывания искусственных осадков из конвективных облаков нашел применение в практике тушения и профилактики возникновения лесных пожаров [98, 99]. Для доставки химических реагентов и их диспергирования в настоящее время могут быть использованы самолеты типа Ан-12, Ан-26, Ан-30, Ил-78 и другие, оснащенные специальными генераторами для диспергирования кристаллизирующих реагентов (например, йодистого серебра) и установками для применения хладореагентов (в частности, твердой углекислоты и жидкого азота) [5, 91].

С учетом наличия в нашей стране средств воздействия облаков, а также принимая во внимание полученные в настоящей работе количественные оценки пригодности конвективных облаков к воздействию с целью вызывания искусственных осадков, можно сделать вывод о целесообразности проведения работ по воздействию на конвективные облака с целью профилактики возникновения лесных пожаров и борьбы с ними.

Наряду с полученными выше оценками пригодности КОБЛ к вызыванию искусственных осадков, имеются также данные, характеризующие пригодность таких облаков к засеву с целью их разрушения (рисунок 3.12) [91].

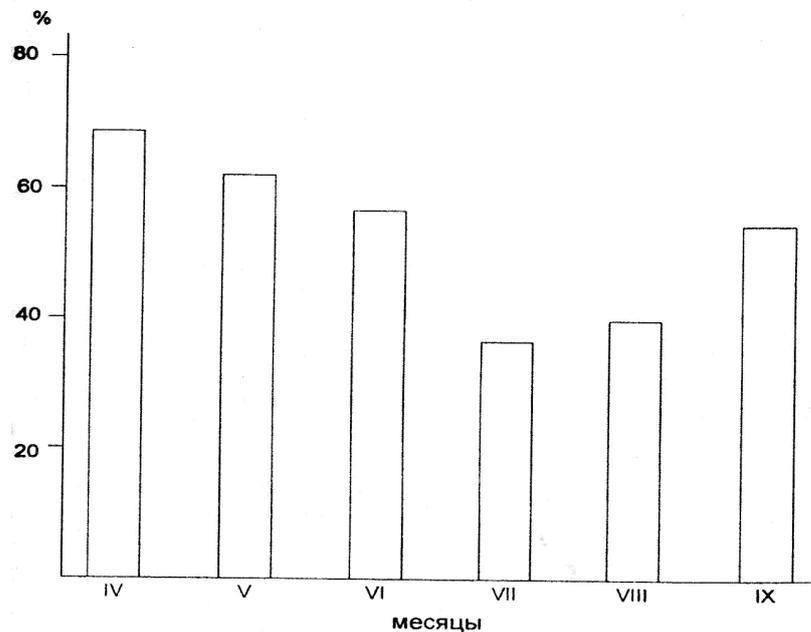


Рисунок 3.12 – Повторяемость пригодных к рассеянию конвективных облаков над Внуково

Конвективные облака считались пригодными к воздействию с целью рассеяния, если их мощность превышала 4-5 км. Поскольку воздействия на конвективные облака в этом случае целесообразно осуществлять методом сброса сыпучих материалов (например, цемента), то ни температура, ни фазовое строение облака в этом случае во внимание не принимались.

Приведенные на рисунке оценки повторяемости пригодных к рассеянию конвективных облаков показывают, что чаще всего условия для воздействия на облака отмечаются в апреле (68%).

В июле таких облаков наблюдается меньше всего – 40%. В целом в теплое полугодие повторяемость пригодных к рассеянию конвективных облаков составляет чуть более 50%.

Полученные данные могут быть использованы при планировании, подготовке и проведении мероприятий, связанных с воздействием на облака с целью их рассеяния для решения широкого круга прикладных задач, в том числе в интересах повышения качества аэрокосмического мониторинга природной среды.

Следует отметить, что к настоящему времени в нашей стране разработан ряд руководящих документов в области воздействия на конвективные облака [114, 115, 118, 119].

Приведенная выше методика, наряду с разработанными в диссертации методиками воздействия на волнистообразные и слоистообразные облака, составляют основу метода оценивания потенциала воздействия на переохлажденные облака над центральным районом ЕТР.

Одним из элементов, связанных с разработкой метода оценивания потенциала переохлажденной облачности, является его апробация на примере создания методики подготовки и проведения мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков в интересах решения прикладных задач (см. главу 5).

Выводы по 3 главе

Получены количественные оценки пригодности переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков к воздействию с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния (стабилизации) облачного покрова. Установлено, что переохлажденные волнистообразные облака пригодны к рассеянию (стабилизации) зимой в 81,8% случаев, в холодное полугодие – в 76,9% случаев, слоистообразные облака – 10,8% и 10,0% соответственно. Значения повторяемости волнистообразных облаков, пригодных к вызыванию осадков составляет зимой и в холодное полугодие 40,9% и 37,2%, к интенсифицированию осадков – 45,8% и 43,8% соответственно. Повторяемость слоистообразных облаков, пригодных к вызыванию осадков составляют зимой и в холодное полугодие 26,9% и 23,9%, к интенсифицированию осадков – 59,6% и 59,0% соответственно.

Конвективные облака пригодны для воздействия в среднем за теплое полугодие в 48% случаев. Максимум повторяемости (55%) наблюдается в мае, минимум (32%) – в сентябре. Повторяемость конвективных облаков, пригодных к рассеянию составляет в среднем в теплое полугодие чуть более 50%, достигая максимума в апреле (68%) и минимума – в июле (40%).

4. КОМПЛЕКС МЕТОДИК ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НА ОБЛАКА РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ

В настоящее время в литературе приводится ряд работ, в которых приводятся сведения о методиках по воздействию на облака различных форм [155, 156, 163]. Вместе с тем, детальный анализ этих работ показывает, что они не могут считаться исчерпывающими. Это связано с тем, что в одних работах схема засева облаков представляет собой «змейку» [163], в других – не приводится полный расчет характеристик мероприятий по воздействию [155, 156]. Исходя из этого, ниже представлены методики по воздействию на переохлажденные волнистообразные и конвективные облака с целью рассеяния и вызывания искусственных осадков, а также методики расчета количества искусственных (интенсифицированных) осадков при воздействии на переохлажденные волнистообразные облака. Здесь же приведена методика расчета стоимости мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков.

4.1. Методика воздействия на переохлажденные волнистообразные облака с целью их рассеяния

Рассмотрим подробнее порядок проведения расчета параметров, необходимых для подготовки и проведения мероприятий по рассеянию ВОБЛ.

Если решение на проведение мероприятий по рассеянию ВОБЛ принято, то орган управления приступает к подготовке проведения этих мероприятий, ставит задачу группе метеорологического обеспечения на подготовку операции по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков. При этом требования к результатам операции по рассеянию облаков должны сводиться к следующим: требуется раскрыть от облаков заданный район размерами l и l_T к директивному времени $\tau_{дир}$ и держать его раскрытым в течение интервала времени $\tau_{тр}$.

Расчет параметров мероприятий по рассеянию переохлажденных слоистых, слоисто-кучевых облаков должен включать в себя два этапа [73].

1 Этап.

Включает в себя проведение совокупности следующих операций (действий):

1. Получение данных о характеристиках ВОБЛ (скорость и направление перемещения облачного слоя, температурные и геометрические характеристики, горизонтальная протяженность облачных слоев и др.). Для этого привлекаются различные технические средства (самолеты-разведчики, самолеты-лаборатории, метеорологические локаторы, ИСЗ и др.).

2. В случае соответствия характеристик переохлажденных ВОБЛ критерию пригодности к рассеянию принимается решение о выборе схемы воздействия с целью решения конкретной прикладной задачи (например, проведение поисково-спасательных работ) (см. рисунок 4.1).

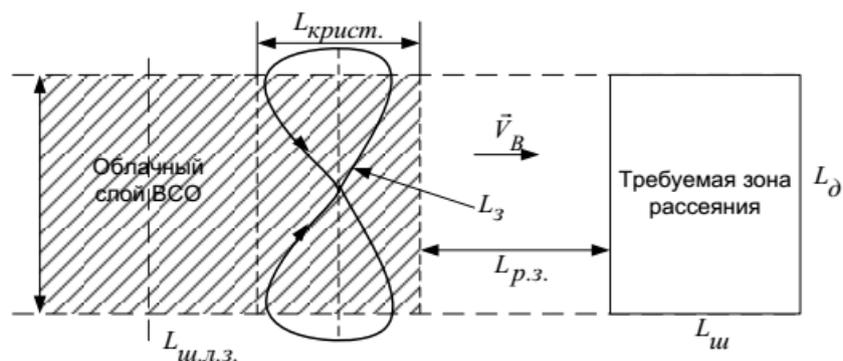


Рисунок 4.1 – Схема засева переохлажденных волнистообразных облаков с целью их рассеяния

При определении схемы засева будем исходить из следующих соображений. Засев осуществляется по верхней границе облачного слоя, при этом линия засева располагается с учетом скорости движения облаков на уровне засева и ширины зоны кристаллизации, образующейся в результате применения химических реагентов. В связи с этим схема засева облаков представляет собой «восьмерку».

3. На основании данных о температурных характеристиках переохлажденных ВОБЛ определяется расстояние между линиями засева и осуществляется выбор химических реагентов для засева.

4. Исходя из данных о мощности и горизонтальной протяженности ВОБЛ определяется требуемое количество самолетов.

5. На основании действий, выполненных в п.п. 1-4, проводятся организационные мероприятия по подготовке техники и персонала к проведению рассеяния переохлажденных ВОБЛ.

Выполнение мероприятий по 1 этапу дает возможность перейти к мероприятиям в рамках 2 этапа.

2 этап.

В соответствии с выбранной схемой засева облаков на 2 этапе проводится расчет характеристик мероприятий по рассеянию ПВОБЛ с целью решения конкретной прикладной задачи. Рассмотрим схему засева облаков одним самолетом, представленную на рисунке 3.1. В качестве решаемой задачи рассмотрим задачу по проведению поисково-спасательных работ (ПСР) в каком-либо заданном районе. Расчет характеристик операции по рассеянию облаков включает в себя проведение следующих мероприятий:

1. Расчет рубежа засева от предполагаемого района раскрытия цели, рассчитывается по формуле

$$L_{р.з.} = v_0 \cdot t_{ср}, \quad (4.1)$$

где $L_{р.з.}$ – рубеж засева от зоны раскрытия цели, км;

v_0 – скорость перемещения облаков, км/ч;

$t_{ср}$ – время срабатывания реагента, ч. В соответствии с эксплуатационными данными оно составляет в среднем 20 мин. или 1/3 часа [155, 156].

2. Определение длины линии L_3 засева одним самолетом определяется следующим образом

$$L_3 = v_c \cdot t, \quad (4.2)$$

где L_c – скорость полета самолета, км/ч;

t – время нахождения самолета на линии засева, ч.

Определение времени t нахождения самолета на линии засева (L_3), которое определяется на основе данных о ширине зоне кристаллизации облачного слоя от одной линии засева $\Delta L_{\text{крист.}}$ и скорости перемещения облачного покрова v_0 . Расчет времени (t) проводится по формуле:

$$t = \frac{\Delta L_{\text{крист.}}}{v_0}. \quad (4.3)$$

3. Расчет длины линии засева одним самолетом с учетом времени на разворот (t_p) самолета, определяется по формуле

$$L'_3 = L_3 - v_c \cdot t_p \quad (4.4)$$

или, с учетом (4.2) и (4.3),

$$L'_3 = v_0 \left(\frac{\Delta L_{\text{крист.}}}{v_0} - 2t_p \right). \quad (4.5)$$

4. Расчет площади зоны раскрытия от облачности, в результате одиночного засева определяется путем произведения длины линии засева (L'_3) на ширину зоны кристаллизации ($\Delta L_{\text{крист.}}$)

$$S_{\text{раск.}} = L'_3 \cdot \Delta L_{\text{крист.}}. \quad (4.6)$$

5. Определение расстояния между линиями засева $L_{\text{ш.л.з.}}$. Расстояние определяется, исходя из данных о температурных характеристиках ПВОБЛ, применяемого реагента, мощности облаков, скорости их перемещения и эволюции. При мощности ПВОБЛ до 300 м и средней для облачного слоя температуры ($t^{\circ}_{\text{ср. обл.}}$) ниже минус 3°C расстояние между линиями засева (или ширина зоны кристаллизациями – $\Delta L_{\text{крист.}}$) берется равным 3 км. При мощности ПВОБЛ более 500 м и $t^{\circ}_{\text{ср. обл.}}$ от минус 1,0 до минус 3,0°C расстояние между линиями засева уменьшается до 1,0 ÷ 1,5 км.

6. Определение требуемого числа линий засева ($N_{\text{л.з.}}$) при работе одного самолета рассчитывается по формуле

$$N_{\text{л.з.}} = \frac{T}{t}, \quad (4.7)$$

где T – требуемое время поддержания района десантирования раскрытым от облаков, ч.

7. Оценка требуемого расхода реагента. Количество требуемого реагента определяется, исходя из характеристик ПВОБЛ, стадии его эволюции, необходимого времени поддержания района раскрытым от облаков, и рассчитывается по формуле

$$Q = Q_{\text{р/км}} \cdot N_{\text{л.з.}} \cdot L_3, \quad (4.8)$$

где $Q_{\text{р/км}}$ – расход реагента на километр полета самолета по линии засева, г(кг)/км.

Расход количества использованного реагента произведен для твердой углекислоты (CO_2). Выполненные к настоящему времени работы по воздействию на облака позволили

определить нормы расхода этого реагента, исходя из значений мощности облачного слоя ΔH (см. таблицу 4.1) [155, 156]:

Таблица 4.1

Нормы расхода твердой углекислоты (q_{CO_2} г/км) при засеве переохлажденных волнистообразных облаков

ΔH , м	200	250	300	350	400	450	500	550	600	> 650
q_{CO_2} , г/км	100	150	200	250	350	450	550	700	800	1000

Предварительный расчет параметров операции по рассеянию ПВОБЛ выполняется с целью подготовки требуемых сил и средств. При этом используются прогностические значения параметров состояния атмосферы. Непосредственно перед проведением операции по рассеянию ПВОБЛ расчет необходимых параметров осуществляется с учетом уточненных значений параметров состояния атмосферы, которые представляют собой данные измерений (наблюдений) и сверхкраткосрочные прогнозы. В ходе проведения операций по рассеянию ПВОБЛ осуществляется также уточнение данных о ветре по средствам самолетных и радиолокационных наблюдений. По этим данным выполняется коррекция маршрутов движения самолета. Важно отметить, что на одном самолете могут одновременно находиться как средства диспергирования, так и средства для проведения поисково-спасательных работ (ПСР). Поэтому, один и тот же самолет может осуществлять как засева облаков с целью их рассеяния, так и проведение ПСР или экологического мониторинга.

4.2. Методика воздействия на переохлажденные волнистообразные облака с целью вызывания (интенсифицирования) осадков

Рассмотрим схему засева облаков одним самолетом, представленную на рисунке 4.1. В качестве решаемой задачи рассмотрим задачу по например, по вызыванию искусственных осадков над крупным городом с целью очищения воздушного бассейна от загрязняющих примесей. Расчет характеристик включает в себя проведение следующих мероприятий [60]:

1. Расчет рубежа засева от предполагаемого района вызывания осадков, рассчитывается по формуле

$$L_{\text{р.з.}} = v_0 \cdot t_{\text{ср}}, \quad (4.9)$$

где $L_{\text{р.з.}}$ – рубеж засева от зоны раскрытия цели, км;

v_0 – скорость перемещения облаков, км/ч;

$t_{\text{ср}}$ – время срабатывания реагента, ч. В соответствии с эксплуатационными данными оно составляет в среднем 20 мин. или 1/3 часа [155, 156].

2. Определение длины линии засева L_3 одним самолетом. Длина линии засева выбирается с таким расчетом, чтобы при заданной ширине зоны кристаллизации обеспечивалась полная кристаллизация натекающих облаков. Это достигается в том случае, если за время нахождения самолета на линии воздействия облачный покров

сместился на расстояние, равное ширине зоны кристаллизации от одной линии. Определение линии засева производится по формуле (4.10)

$$L_3 = v_c \cdot t, \quad (4.10)$$

где v_c – скорость полета самолета, км/ч;

t – время нахождения самолета на линии засева, ч.

3. Определение длины линии засева с учетом времени на разворот самолета ($t_{\text{раз.}}$)

$$L_3 = L - v_c t_{\text{р}}. \quad (4.11)$$

4. Расчет времени нахождения самолета на линии засева. Расчет проводится по данным о ширине зоны кристаллизации и скорости облачного слоя

$$t = \frac{\Delta L_{\text{крист.}}}{v_0}, \quad (4.12)$$

где $\Delta L_{\text{крист.}}$ – ширина зоны кристаллизации облачного слоя, км;

v_0 – скорость перемещения облачного слоя, км/ч.

Для практических расчетов ширина зоны кристаллизации принята равной 3 км [155, 156].

5. Определение общего числа линий засева

$$N = \frac{L_{\text{обл. сист.}}}{\Delta L_{\text{крист.}}}, \quad (4.13)$$

где N – общее число линий засева;

$L_{\text{обл. сист.}}$ – ширина облачной системы, км.

6. Расчет общего количества жидкокапельной влаги в слое кристаллизации в предположении равномерного распределения кристаллов по всему объему

$$Q = q_{\text{ср}} \cdot \Delta H \cdot \Delta L_{\text{крист.}} \cdot L_3, \quad (4.14)$$

где Q – количество жидкокапельной влаги в засеянном объеме облака, г;

$q_{\text{ср}}$ – средняя водность, г/м³;

ΔH – средняя мощность пригодных к засеву St-Sc облаков, м.

7. Расчет количества вызываемой из засеянного объема влаги

$$Q_1 = Q \cdot K, \quad (4.15)$$

где Q_1 – количество вымываемой из облачного слоя влаги, г;

K – коэффициент реализации водозапасов.

Значения берутся равными 0,6-0,8 [155, 156].

8. Расчет ширины зоны искусственных осадков вдоль направления переноса

$$L_{\text{ш}} = v_0 \cdot \tau_{\text{ос}}, \quad (4.16)$$

где $L_{\text{ш}}$ – ширина зоны искусственных осадков, км;

$\tau_{\text{ос}}$ – длительность выпадения искусственных осадков, ч. Согласно [155, 156],

$$\tau_{\text{ос}} = 40 \text{ мин. или } \tau_{\text{ос}} = 2/3 \text{ ч.}$$

9. Определение площади зоны искусственных осадков

$$S = L_{\text{ш}} \cdot L_3, \quad (4.17)$$

где S – площадь зоны искусственных осадков, км².

10. Расчет количества искусственных осадков (при их равномерном распределении на площади S) от одной линии засева

$$Q_2 = \frac{Q_1}{S}. \quad (4.18)$$

11. Расчет общего количества искусственных осадков при воздействии на всю облачную систему

$$Q_3 = Q_2 \cdot N \quad (4.19)$$

или

$$Q_3 = \frac{K \cdot q_{\text{ср}} \cdot \Delta H \cdot L_{\text{обл. сист.}}}{v_0 \cdot \tau_{\text{ос.}}} \quad (4.20)$$

При

$$L_{\text{обл. сист.}} = v_0 \cdot \tau, \quad (4.21)$$

где τ – время существования облаков над пунктом, ч и $\tau_{\text{ос.}} = 2/3$ [156] выражение (4.21) примет вид

$$Q_{\text{ис.ос.}} = \frac{3}{2} K \cdot q_{\text{ср.}} \cdot \Delta H \cdot \tau \cdot 10^{-3}, \quad (4.22)$$

где $Q_{\text{ис.ос.}}$ – количество искусственных осадков при воздействии на слоистые, слоисто-кучевые облака в течение одного дня, мм.

Для длительного периода воздействия (месяц, сезон, полугодие) расчет количества искусственных осадков проводится по формуле

$$Q'_{\text{ис.ос.}} = Q_{\text{ис.ос.}} \cdot n \cdot a, \quad (4.23)$$

где $Q'_{\text{ис.ос.}}$ – количество искусственных осадков при воздействии на слоистые, слоисто-кучевые облака в течение месяца, сезона, полугодия, мм;

n – число дней с волнистообразными облаками в месяце, сезоне, полугодии;

a – коэффициент пригодности к вызыванию осадков ПВОБЛ по месяцам, сезонам, полугодиям.

При расчетах могут быть использованы средние значения параметров волнистообразных облаков, пригодных к вызыванию искусственных осадков, приведенных в таблице Г.6 Приложения Г.

Расчеты показали, что количество искусственных осадков при воздействии на переохлажденные ВОБЛ может составить зимой 18,4, а в холодное полугодие – 26,0 мм, или 13,7 и 11,7% от средней нормы осадков зимой (133 мм) и в холодное полугодие (227 мм).

В таблицах Г.9-Г.12 Приложения Г приведены статистические оценки числовых характеристик распределения мощности и средней температуры пригодных к рассеянию и вызыванию осадков ыолнистообразных облаков.

Настоящая методика может быть использована в оперативной практике для оценки количества искусственных осадков из переохлажденных волнистообразных (слоистых, слоисто-кучевых) облаков в любом физико-географическом районе Российской Федерации.

Поскольку в формулу (4.23), определяющую общее количество искусственных (интенсифицированных) осадков за месяц, сезон, полугодие, входит коэффициент пригодности к воздействию (a), то необходимо иметь его оценки (числовые значения).

Иными словами, необходимо иметь оценки пригодности к вызыванию (интенсифицированию) осадков над рассмотренным в диссертации районом (или каким-то его частям). Результаты проведенного в этом направлении исследования приведены в третьей главе диссертации (п. 3.3.1).

4.3. Методика расчета стоимости мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков

В общем случае стоимость мероприятий ($C_{\text{оп.}}$) по рассеянию волнистообразных облаков будет определяться стоимостью реагента (C_p), используемого для засева облаков, а также стоимостью топлива, используемого для проведения операции ($C_{\text{топл.}}$), аренды самолета ($C_{\text{ар. сам.}}$) и стоимостью услуг, предоставляемых наземными службами обеспечения и управления воздействием ($C_{\text{наз. сл.}}$)

$$C_{\text{оп.}} = C_p + C_{\text{топл.}} + C_{\text{ар. сам.}} + C_{\text{наз. сл.}} \quad (4.24)$$

Рассмотрим более подробно каждое из слагаемых уравнения (4.24).

Для определения стоимости реагента необходимо знать стоимость одного килограмма реагента C'_p , а также общую массу реагента (M), потребного для засева облаков и находящегося на борту одного самолета, т. е.

$$C_p = C'_p \cdot M \cdot n, \quad (4.25)$$

где n – число самолетов, необходимых для засева облаков.

Масса реагента M будет определяться массой реагента, идущего на засев одного километра пути самолета в облаке, длиной $L_{\text{л.з.}}$, а также общим числом таких линий засева (N). В свою очередь линия засева $L_{\text{л.з.}}$ может быть определена по следующей формуле

$$L_{\text{л.з.}} = v_c \cdot t, \quad (4.26)$$

где v_c – скорость полета самолета, км/ч;

t – время нахождения самолета на линии засева $L_{\text{л.з.}}$.

Время t определяется как отношение ширины зоны засева реагента ($\Delta L_{\text{ш. засева}}$) к скорости переноса облачного слоя (v_0), т. е.

$$t = \frac{\Delta L_{\text{ш. засева}}}{v_0}. \quad (4.27)$$

С учетом времени на разворот (t_p) самолета длина линии засева будет равна

$$L'_{\text{л.з.}} = L_3 - 2v_c \cdot t_p \quad (4.28)$$

или

$$L'_3 = v_c \left(\frac{\Delta L_{\text{ш. засева}}}{v_0} - 2t_p \right). \quad (4.29)$$

Тогда общая масса реагента (M), потребного для засева будет равна

$$M = N \cdot L'_3 \cdot m, \quad (4.30)$$

где m – расход реагента на один километр пути самолета, кг/км.

В свою очередь число линий засева определяется выражением (4.31)

$$N = \frac{T_2}{t} = \frac{T_2 \cdot v_0}{\Delta L_{\text{ш. засева}}}, \quad (4.31)$$

где T_2 – время засева химическими реагентами (ХР) облаков.

Тогда с учетом выражений (4.29) и (4.31), выражение (4.30) примет следующий вид

$$M = v_c \left(\frac{\Delta L_{\text{ш. засева}}}{v_0} - 2t_p \right) \cdot m \cdot \frac{T_2 v_0}{\Delta L_{\text{ш. засева}}}, \quad (4.32)$$

Выражение для стоимости реагента C_p , определяемого по формуле (4.25), примет вид

$$C_p = C'_p \cdot v_c \cdot \left(\frac{\Delta L_{\text{ш. засева}}}{v_0} - t_p \right) \cdot m \cdot \frac{T_2 v_0}{\Delta L_{\text{ш. засева}}}. \quad (4.33)$$

Стоимость топлива (керосина) ($C_{\text{топл.}}$), необходимого для проведения операции по воздействию на волнистообразные облака, может быть определена по формуле

$$C_{\text{топл.}} = M_T \cdot T \cdot n \cdot C_p, \quad (4.34)$$

где M_T – расход топлива за один час работы самолета, кг/ч;

n – число самолетов, необходимых для проведения операции по засеву химическими реагентами облаков;

C_p – цена одного кг топлива, руб.;

T – время работы самолета (ч), представляемое в виде

$$T = T_1 + T_2 + T_3, \quad (4.35)$$

где T_1 – время, необходимое для полета самолета от аэродрома базирования до района засева облаков, ч;

T_2 – время засева ХР облаков, с целью их рассеяния, ч;

T_3 – время, потребное для полета самолета от района засева облаков до аэродрома базирования, ч.

Время T_2 будет определяться временем, необходимым для нахождения районом ПСР в состоянии, раскрытым от облаков $t_{\text{тр}}$, и запасом времени, необходимым для страховки. Тогда

$$T_2 = t_{\text{тр}} + t_{\text{запас}}.$$

Промежуток времени $t_{\text{запас}}$ определим равным 60 мин. или 1 час.

Стоимость аренды самолета ($C_{\text{ар. сам.}}$) будет складываться из стоимости оплаты экипажа ($C_{\text{опл. экип.}}$), стоимости амортизации бортового вычислительного комплекса ($C_{\text{выч. комп.}}$), используемого для проведения засева облака, а также стоимости амортизации средств диспергирования химического реагента ($C_{\text{ср. дисп. ХР}}$), т.е.

$$C_{\text{ар. сам.}} = C_{\text{опл. экип.}} + C_{\text{выч. комп.}} + C_{\text{ср. дисп. ХР}} \cdot \quad (4.36)$$

В случае использования нескольких самолетов (n) выражение (4.36) примет следующий вид

$$C_{(\text{ар. сам.})n} = n \left(C_{\text{опл. экип.}} + C_{\text{выч. комп.}} + C_{\text{ср. дисп. ХР}} \right). \quad (4.37)$$

Наконец, стоимость эксплуатации наземных служб ($C_{\text{наз. сл.}}$) будет включать в себя, главным образом, стоимость услуг по прогнозированию облачной обстановки и анализу данных текущей ситуации ($C_{\text{син. обс.}}$), стоимость оплаты работников наземных служб ($C_{\text{опл. наз. сл.}}$) и стоимость оплаты эксплуатации наземных технических средств ($C_{\text{эксп. наз. ср.}}$) (в частности, МРЛ-5), т. е.

$$C_{\text{наз. сл.}} = (C_{\text{син. обс.}} + C_{\text{опл. наз. сл.}} + C_{\text{эксп. наз. ср.}}). \quad (4.38)$$

Тогда, с учетом входящих в уравнение (4.24) слагаемых, определяемых соответствующими уравнениями (4.25), (4.33), (4.34), (4.37), оно примет следующий вид

$$C_{\text{оп.}} = C'_p \cdot \frac{T_2 \cdot v_0}{\Delta L_{\text{ш. засева}}} \cdot v_c \left(\frac{\Delta L_{\text{ш. засева}}}{v_0} - 2t_p \right) \cdot m + M_T (T_1 + T_2 + T_3) n \cdot C_p + \quad (4.39)$$

$$+ n (C_{\text{опл. экип.}} + C_{\text{выч. комп.}} + C_{\text{ср. дисп. ХР}}) T + n (C_{\text{син. обст.}} + C_{\text{опл. наз. сл.}} + C_{\text{эксп. наз. сл.}}) T$$

Таким образом, подставив в формулу (4.39) все необходимые данные, можно рассчитать стоимость мероприятий как при засеве переохлажденных, так и теплых волнистообразных облаков. При этом, однако, необходимо иметь в виду, что во втором случае для засева облаков необходимо использовать гигроскопические реагенты (например, мочевины, поваренную соль, аммиачную селитру, хлористый кальций). При засеве «теплых» волнистообразных облаков расстояние между линиями засева составляет порядка 1,0-1,5 км соответственно. В расчетах необходимо брать стоимость используемых при засеве гигроскопических реагентов. Следует отметить, что формула (4.39) может быть использована также и при оценке стоимости мероприятий по вызыванию (интенсифицированию) осадков из волнистообразных облаков, так и при стабилизации слоистых, слоисто-кучевых облаков. Конкретный пример расчета стоимости мероприятий по рассеянию переохлажденных ВОБЛ приведен в главе 5.

4.4. Методики расчета количества искусственных (интенсифицированных) осадков из переохлажденных слоистообразных облаков

В настоящее время воздействия могут проводиться (и это подтверждается практикой работ в ряде стран мира [5]) не только на ВОБЛ с целью их рассеяния и вызывания (интенсифицирования) осадков, но и на облака других форм, в частности, слоистообразные облака. Согласно [146] к ним относят слоисто-дождевые (Ns) и высоко-слоистые (As) облака (облака верхнего яруса – перисто-слоистые (Cs) в данном случае во внимание не принимаются). Основными целями воздействия на такие облака являются, главным образом, вызывание искусственных или интенсифицирование естественных осадков. При этом, также как и в случае ВОБЛ, вызывание (интенсифицирование) осадков из СОБЛ должны быть сосредоточены над какой-то определенной площадью и в течение конкретного времени. Поэтому получается, что все рассуждения, касающиеся содержательной и математической постановок задач, а также выбора схемы засева ВОБЛ, изложенные в предварительной части п. 3.3 (до начала п. 3.3.1), в полной мере могут быть отнесены и к слоистообразным облакам. Следовательно, также как и в случае ВОБЛ, методика воздействия на переохлажденные слоистообразные облака с целью интенсифицирования (вызывания) осадков может быть сведено, главным образом, к

разработке методик расчета количества интенсифицированных (вызванных) осадков. Результаты разработки приведены ниже.

Методики расчета количества интенсифицированных (вызванных) осадков из переохлажденных слоистообразных облаков

Поскольку методики расчета количества как интенсифицированных, так и искусственных осадков из переохлажденных слоистообразных облаков во многом схожи по последовательности действий, более подробно следует остановиться на изложении первой из них.

Методика расчета количества интенсифицированных осадков из переохлажденных слоистообразных облаков

Расчет количества интенсифицированных осадков из переохлажденных слоистообразных облаков при регулярном и длительном их засеве (месяц, сезон, полугодие) осуществляется в два этапа.

На первом этапе определяется количество осадков при засеве единичного фронта

$$Q'_1 = \frac{\kappa_1 \cdot \Delta H_1 \cdot q_{\text{ср}1} \cdot L_{\text{обл.сист.}} \cdot 10^{-3}}{L_{\text{инт.}}}, \quad (4.40)$$

- где Q'_1 – количество интенсифицированных осадков, мм;
 κ_1 – коэффициент, учитывающий фазовые преобразования в облаке в результате засева, $\kappa_1 = 1,4-2,0$;
 $\Delta H_1, q_{\text{ср}1}$ – средние значения мощности и водности [г/м³] слоистообразных облаков, пригодных к интенсифицированию осадков;
 $L_{\text{обл.сист.}}$ – ширина пригодной к интенсифицированию осадков облачной системы, км;
 $L_{\text{инт.}}$ – ширина зоны интенсифицированных осадков, км.

При расчетах $L_{\text{инт.}}$ принимается равной ширине зоны одночасового переноса облачности [155, 156].

С учетом того, что

$$L_{\text{обл.сист.}} = U_0 \cdot \tau_1, \quad (4.41)$$

где τ_1 – длительность существования фронтальной облачности над пунктом, ч;

и

$$L_{\text{инт.}} = U_0 \cdot \tau_{\text{инт.}}, \quad (4.42)$$

где $\tau_{\text{инт.}}$ – длительность выпадения интенсифицированных осадков от одной линии засева, ч;

и, приняв $\tau_{\text{инт.}} = 1$ час, получим:

$$Q'_1 = \kappa_1 \cdot \Delta H_1 \cdot q_{\text{ср}1} \cdot \tau_1 \cdot 10^{-3}. \quad (4.43)$$

При наличии сведений о длительности существования фронтальной облачности над пунктом для расчета количества интенсифицированных осадков следует использовать

формулу (4.43), а при наличии данных о ширине облачных систем – формулу (4.40). В настоящее время данные о ширине облачных полей могут быть получены с помощью ИСЗ.

Суть второго этапа состоит в следующем:

1. Рассчитывается количество интенсифицированных осадков в результате длительного, регулярного засева осадконесущих фронтов

$$Q'_2 = Q'_1 \cdot n_1 \cdot a_1, \quad (4.44)$$

где n_1 – число фронтов с осадками в течение месяца, сезона, полугодия;

a_1 – коэффициент пригодности к интенсифицированию осадков фронтальных облаков по месяцам, сезонам, полугодиям.

2. Определяется количество осадков в результате засева фронтальных облаков с учетом различного числа одновременно пригодных к засеву облачных слоев

$$Q'_3 = P_1 \cdot Q'_1 \cdot n_1 \cdot a_1, \quad (4.45)$$

$$Q'_4 = 2P_2 \cdot Q'_1 \cdot n_1 \cdot a_1, \quad (4.46)$$

$$Q'_5 = 3P_3 \cdot Q'_1 \cdot n_1 \cdot a_1, \quad (4.47)$$

Здесь P_1, P_2, P_3 – повторяемость пригодных к интенсифицированию осадков фронтальных облаков с одним, двумя и тремя слоями в течение месяца, сезона, полугодия.

3. Находится количество осадков с учетом повторяемости условий, когда под пригодными к засеву облаками находится непригодная для этих целей облачность.

$$Q'_6 = P_4 \cdot Q'_7 \cdot n_1 \cdot a_1, \quad (4.48)$$

где P_4 – повторяемость условий наличия под пригодными к засеву облаками непригодной для интенсифицирования осадков облачности;

Q'_7 – количество влаги, вымываемой из непригодных к засеву облаков.

$$Q'_7 = \frac{\kappa' \cdot \Delta H' \cdot q'_{\text{ср}} \cdot L_{\text{обл.сист.}} \cdot 10^{-3}}{L_{\text{инт.}}}, \quad (4.49)$$

где κ' – коэффициент вымывания влаги из непригодных к засеву облаков;

$\Delta H' \cdot q'_{\text{ср}} \cdot L_{\text{обл.сист.}}$ – мощность, водность и ширина непригодных к засеву облаков, м; г/м³; км.

4. Рассчитывается общее количество интенсифицированных осадков при регулярном, длительном воздействии в течение месяца, сезона, полугодия.

$$Q_{\text{инт.}} = Q'_3 + Q'_4 + Q'_5 + Q'_6. \quad (4.50)$$

Формула (4.50) с учетом (4.43-4.48) может быть представлена в следующем виде:

$$Q_{\text{инт.}} = \left[B \cdot \kappa_1 \cdot \Delta H_1 \cdot q_{\text{ср}} \cdot L_{\text{обл.сист.}} + B' \cdot \kappa' \cdot \Delta H' \cdot q'_{\text{ср}} \cdot L'_{\text{обл.сист.}} \right] \cdot \frac{n_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}}{L_{\text{инт.}}}, \quad (4.51)$$

где $B = P_1 + 2P_2 + 3P_3$; $B' = P_4$.

При отсутствии данных о числе осадконесущих фронтов расчет количества интенсифицированных осадков можно проводить по формуле, приведенной в [166]

$$R_{\text{инт.}} = b \cdot \bar{R}_{\text{ос}}, \quad (4.52)$$

где $R_{\text{инт.}}$ – количество интенсифицированных осадков при засеве слоисто-дождевых облаков, мм;

- b – коэффициент пригодности к интенсификации осадков слоисто-дождевых облаков;
- $\bar{R}_{ос}$ – среднее многолетнее количество осадков за определенный период, мм.

Методика расчета количества искусственных осадков из переохлажденных слоистообразных облаков

При разработке методики расчета количества искусственных осадков при засеве фронтальных облаков предполагалось, что размеры зоны выпадения осадков при таких ситуациях будут такими же, как и в случае St-Sc облаков [154-156]. Поэтому при определении количества искусственных осадков из фронтальных облаков могут быть использованы ранее полученные результаты. В частности, количество искусственных осадков при засеве единичного фронта может быть определено с помощью соотношения

$$Q_{иск.ос.фр.} = \frac{\kappa_{п} \cdot q_{ср.п} \cdot \Delta H_{п} \cdot \tau_{п} \cdot 10^{-3}}{\tau_{ос}}, \quad (4.53)$$

- где $\kappa_{п}$ – коэффициент вымывания влаги из пригодных к засеву фронтальных облаков;
- $q_{ср.п} \cdot \Delta H_{п}$ – средние значения водности и мощности пригодных к засеву облаков без осадков, г/м³, м;
- $\tau_{п}$ – длительность существования над пунктом фронтальных облаков без осадков, ч.

Расчет количества искусственных осадков при длительном, регулярном засеве фронтальных облаков проводится в такой же последовательности, как и в случае определения количества интенсифицированных осадков.

Формула для засева количества искусственных осадков при засеве фронтальных облаков в течение месяца, сезона, полугодия имеет следующий вид:

$$Q'_{иск.ос.фр.} = \left[A \cdot \kappa_{п} \cdot \tau_{п} \cdot \Delta H_{п} \cdot q_{ср.п} + A' \cdot \kappa_{н} \cdot \tau_{н} \cdot \Delta H_{н} \cdot q_{ср.н} \right] \cdot \frac{n_2 \cdot a_2}{\tau_{ос}} \cdot 10^{-3}, \quad (4.54)$$

- где $\kappa_{н}$ – коэффициент вымывания влаги из непригодных к засеву фронтальных облаков;
- $q_{ср.н} \cdot \Delta H_{н}$ – средние значения водности и мощности непригодных к засеву фронтальных облаков без осадков, г/м³, м;
- $\tau_{н}$ – длительность существования над пунктом непригодных к засеву фронтальных облаков без осадков, ч;
- n_2 – число фронтов без осадков в течение месяца, сезона, полугодия;
- a_2 – коэффициент пригодности к вызыванию осадков фронтальных облаков по месяцам, сезону, полугодью;

$$A = P'_1 + 2P'_2 + 3P'_3; \quad A' = P'_4;$$

- P'_1, P'_2, P'_3 – повторяемость пригодных к вызыванию осадков фронтальных облаков с одним, двумя, тремя слоями в течение месяца, сезона, полугодия;

P_4 – повторяемость условий наличия под пригодным для засева слоем непригодных для вызывания осадков облаков.

Разработанные методики позволяют при наличии соответствующих данных, получить предварительную оценку количества дополнительных осадков при проведении работ по засеву СОБЛ в течение месяца, сезона, полугодия и после апробирования и доработки могут быть рекомендованы к использованию в оперативной практике.

С учетом полученных выше результатов исследований в диссертации на примере ЦР ЕТР проведена оценка искусственных и интенсифицированных осадков из СОБЛ по сезонам и полугодиям. При расчете количества искусственных осадков использованы средние значения характеристик СОБЛ, представленные в таблице Г.7 Приложения Г.

Анализ полученных данных показывает, что количество искусственных осадков при воздействии на СОБЛ невелико и за месяцы холодного полугодия не превышает 6,0 мм (5,4 мм). Зимой это количество осадков составляет 4,4 мм.

Основное количество осадков над ЦР ЕТР может быть получено при воздействии на СОБЛ с осадками (около 50,3% от средней нормы осадков за холодное полугодие (227 мм)) и также 50,2% от средней нормы осадков за зиму (133 мм). Следовательно, зимой в холодное полугодие количество интенсифицированных осадков может составить 66,8 и 114,2 мм (см. таблицу Г.8 Приложения Г).

В таблицах Г.13-Г.16 Приложения Г приведены статистические оценки числовых характеристик распределения мощности и средней для облачного слоя температуры пригодных к вызыванию и интенсифицирования осадков слоистообразных облаков.

Выводы по 4 главе

Разработаны методики воздействия на волнистообразные и слоистообразные облака с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния (стабилизации) облачных слоев.

Разработана методика расчета стоимости мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков.

5. НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАЧНОСТЬ

В настоящей главе содержатся научно-обоснованные рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденную облачность в интересах решения хозяйственных и экологических задач, включающие в себя:

- методику подготовки и проведения мероприятий по воздействию на переохлажденные волнистообразные облака с целью рассеяния в интересах проведения поисково-спасательных работ (ПСР);
- технико-экономические требования к методам и средствам воздействия на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака;
- метод определения водозапаса волнистообразных облаков без непосредственного измерения влажности;
- рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденную облачность на основе полученных данных о ее характеристиках;
- направления дальнейших работ в области воздействия на переохлажденную облачность.

5.1. Методика подготовки и проведения мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков в интересах проведения поисково-спасательных работ

Данная методика разработана в предположении, что ее реализация будет осуществляться силами летного отряда МЧС, которые будут проводить ПСР на площади в несколько десятков квадратных километров в условиях наличия низких волнистообразных облаков, исключающих возможность применения других ЛА, в частности, вертолетов, беспилотных летательных аппаратов, легкомоторных самолетов.

Структура методики приведена на рисунке 5.1. Как следует из данных, представленных на рисунке 5.1, методика включает в себя выполнение 3 этапов, каждый из которых, в свою очередь, состоит из нескольких соответствующих подэтапов.

Этап 1. Включает в себя подэтапы 1.1-1.11.

1.1. На этом подэтапе начальник летного отряда МЧС получает от начальника штаба МЧС задачу на проведение ПСР в заданном районе.

1.2. На основании полученного от начальника штаба приказа (распоряжения) начальник группы быстрого реагирования летного отряда МЧС осуществляет выяснение задачи по проведению ПСР, порядок взаимодействия с другими подразделениями и службами (например, метеорологической и медицинской службами), усиления сил и средств, выделяемых для поставленной задачи. Проводится расчет времени на подготовку и проведение мероприятий по ПСР в заданном районе.

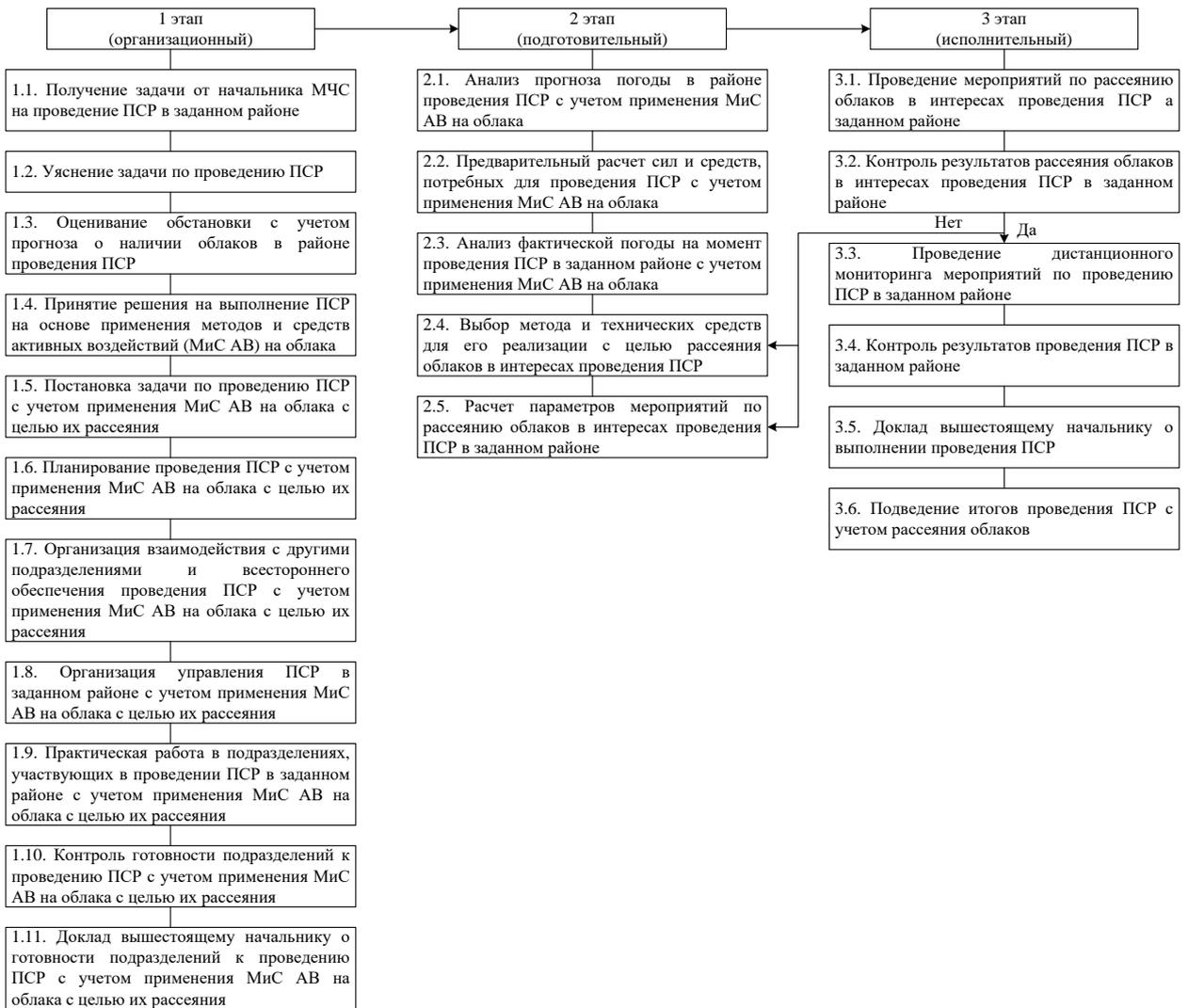


Рисунок 5.1. Структура методики подготовки и проведения мероприятий по воздействию на переохлажденные волнистообразные облака с целью рассеяния в интересах проведения поисково-спасательных работ

1.3. На основании данных о характеристиках существующих средств ПСР (в том числе и имеющихся в распоряжении летного отряда МЧС) проводится оценивание возможностей соответствующих служб МЧС по проведению ПСР своими силами и средствами. Кроме того, на этом этапе определяются:

- объем задач по проведению ПСР в заданном районе;
- возможности соответствующих подразделений и служб МЧС по выполнению в полном объеме задач по проведению ПСР в заданном районе;
- потребность по привлечению дополнительных сил и средств (кроме МЧС) по проведению ПСР.

На основании анализа состояния местности (рельеф, наличие рек, водоемов, состояние почво-грунтов, высоты снежного покрова, условия проходимости) и метеорологических условий (наличие низких облаков и туманов и др.) проводится оценивание их влияния на решение задачи проведения ПСР с помощью наземных и авиационных средств в заданном районе поиска. Оценивание обстановки осуществляется с учетом прогноза и наличия облаков в районе проведения ПСР.

1.4. На основании распоряжения начальника штаба МЧС, а также сделанных из анализа обстановки выводов определяются:

- силы и средства, необходимые для осуществления ПСР в заданном районе;
- задачи исполнителям;
- порядок взаимодействия сил и средств при проведении ПСР.

В рамках данного подэтапа принимается решение на проведение ПСР на основе применения методов и средств активных воздействий (МиС АВ) на облака.

1.5. На основании утвержденных начальником штаба МЧС предложений по проведению ПСР осуществляется подготовка и доведение распоряжений до соответствующих подразделений и служб МЧС (а при необходимости и других министерств и ведомств), привлекаемым для выполнения поставленной задачи.

Осуществляется постановка задачи на проведение ПСР с учетом применения МиС АВ на облака с целью их рассеяния.

1.6. На основании принятого начальником штаба МЧС решения на проведение ПСР и утвержденных им по этим вопросам предложений проводится детальная разработка последовательности и способов выполнения задач по проведению ПСР, включающих в себя:

- определение видов облаков, воздействие на которые с помощью современных средств воздействия приведет к их рассеянию (в случае закрытия заданного района поиска облаками различных форм);
- выбор химических реагентов и их рецептур для воздействия на облака с целью их рассеяния. При положительных значениях температуры воздуха воздействие осуществляется с помощью гигроскопических реагентов (например, хлористый кальций, аммиачная селитра, мочевины и др.). При отрицательных значениях температуры воздуха для воздействия на переохлажденные облака целесообразно использовать хладореагенты (например, твердую углекислоту (CO_2), жидкий азот (N_2));
- выбор технических средств для доставки и диспергирования химических реагентов с целью рассеяния облаков – вертолеты, БЛА, самолеты, оснащенные специальными генераторами и установками для диспергирования химических реагентов;
- выбор способа воздействия на облака (применению к рассеянию рассматриваемой задачи – самолета или вертолета), включающего в себя схему засева с помощью химических реагентов и расчет параметров операции по рассеянию облаков;
- предварительный расчет количества химических реагентов, необходимых для рассеяния облаков в течение требуемого времени и на определенной площади.

1.7. На основании данных о привлекаемых силах и средствах для проведения ПСР в заданном районе проводится согласование действий по цели, месту и времени.

1.8. С учетом данных о центре управления мероприятиями по проведению ПСР, пунктах управления привлекаемых частей (подразделений) МЧС (и других министерств и ведомств) осуществляется распределение задач между органами и пунктами управления, организация связи и передача команд и сигналов.

1.9. На основании распоряжения начальника штаба МЧС в частях (подразделениях), осуществляющих проведение ПСР, проводится уяснение задачи в соответствии с принятым решением. При необходимости оказывается помощь в

уточнении способов выполнения поставленной задачи, организации взаимодействия и всестороннего обеспечения (наличие и доставка химических реагентов, необходимых для воздействия на облака с целью их рассеяния, других материальных средств и т.д.). Выявляются проблемные вопросы и определяются меры по их решению.

1.10. На этом подэтапе осуществляется контроль готовности привлекаемых к выполнению поставленной задачи по проведению ПСР соответствующих подразделений и служб.

1.11. Данный подэтап методики содержит доклад начальнику штаба МЧС о готовности всех привлекаемых к выполнению поставленной задачи по проведению ПСР соответствующих подразделений и служб.

Второй этап содержит выполнение следующих подэтапов:

2.1. Проводится анализ прогноза погоды в районе проведения ПСР на период проведения поиска. Особое внимание уделяется анализу прогностической информации о температуре облаков, подлежащих рассеянию. Это связано с тем, что по температуре воздуха, применительно к проблеме воздействия на облака они подразделяются на «теплые», и «переохлажденные». Различие в температурных характеристиках облаков предопределяет, соответственно, и выбор химических реагентов (гигроскопические реагенты – NaCl, CaCl₂, мочевины, или хладореагенты – твердая углекислота, жидкий пропан).

2.2. Выполняется предварительный расчет сил и средств, необходимых для проведения ПСР (например, количества технических средств и реагента).

2.3. Анализ фактической погоды на момент проведения операции по рассеянию облаков с целью проведения ПСР в заданном районе. На этом этапе вводится коррекция относительно использования метода и средств рассеяния облаков, исходя из фактических данных о характеристиках облаков (расслоенности, фазовой структуры, вертикальной протяженности, средней температуры облачного слоя).

2.4. На этом подэтапе осуществляется выбор метода и технических средств для его реализации с целью рассеяния облаков в районе ПСР, а также выбор схемы засева с использованием авиационного средства.

2.5. На основе исходных данных о раскрываемом от облаков районе (его размеры, время начала и окончания рассеяния облаков, время поддержания района раскрытым от облачности) проводятся расчеты параметров проводимого мероприятия, а именно:

- расстояние рубежа засева облаков от начала зоны раскрытия;
- длина линии засева и их количество (в случае использования авиационных средств);
- количество технических средств (самолетов, вертолетов, БЛА), необходимых для раскрытия района требуемых размеров;
- время поддержания района раскрытым от облаков в течение директивного времени;
- количество реагента, потребного для рассеяния облаков в интересах проведения ПСР в заданном районе.

Этап 3. Включает в себя следующие подэтапы:

3.1. На этом подэтапе осуществляется непосредственное проведение рассеяния облаков в требуемом районе с помощью выбранных технических средств, химических реагентов и способа их применения в интересах осуществления ПСР в заданном районе.

3.2. Характеризуется оцениванием результатов операции по рассеянию облаков. В качестве средств контроля результатов проведенной операции могут быть использованы как средства воздушного, так и средства инструментального контроля (фото и видеосъемка, средства для измерения оптической плотности облаков и др.).

3.3. На данном подэтапе проводится оценивание результатов мероприятий по рассеянию облаков с целью проведения ПСР. Оцениваются все результаты операции как положительные (достижение цели по рассеянию облаков для проведения ПСР), так и отрицательных, расход реагента, рассеяние облаков не над всей территорией, где необходимо осуществление ПСР и др.).

3.4. Проводятся ПСР в заданном районе.

3.5. Подэтап связан с оцениванием результатов операции по непосредственному проведению ПСР в заданном районе (оцениваются полнота и качество проведения работ по поиску).

3.6. Характеризуется докладом вышестоящему начальнику о выполнении работ по осуществлению ПСР в условиях наличия облаков.

3.7. Последний подэтап методики связан с подведением итогов подготовки и проведения мероприятий по проведению ПСР с учетом выполненных мероприятий по рассеянию облаков.

Решение задач по проведению ПСР в условиях облаков в значительной мере определяется качеством проводимых мероприятий по рассеянию волнистообразных облаков. Результаты выполненных в этом направлении исследований приведены ниже.

5.2 Оценивание качества мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков в интересах проведения поисково-спасательных работ

В соответствии с рекомендациями, изложенными в [217], оценивание качества мероприятий по рассеянию ПВОБЛ в интересах проведения поисково-спасательных работ в настоящей работе выполнена по таким показателям как результативность, оперативность, ресурсоемкость. Принимая во внимание возможные экологические последствия применения химических реагентов, используемых при засеивании облаков, в работе выполнено также оценивание и по такому параметру как экологичность³.

Результативность мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков в интересах проведения поисково-спасательных работ

Описание целевого эффекта решения задачи рассеяния облаков и туманов целесообразно начать с определения самого термина, для чего обратимся к соответствующим словарям:

Целевой [218] – 1. Предназначенный для определенной цели.

2. Являющийся целью, представляющей собой цель чего-то.

³ Экологичность (средств воздействия) – качество применяемых при воздействии на облака и туманы химических средств с целью оценивания их возможного негативного влияния на окружающую природную среду.

Эффект [218] латин.*effectus* – действие. 1. Впечатление, производимое кем-чем-н., на кого-нибудь.

2. Действие, производимое кем-чем-н., результат, следствие чего-н.

3. То, что с помощью чего создается какое-н. впечатление.

Эффективный [218] – дающий эффект (во 2 знач.), приводящий к нужным результатам, действенный.

Следовательно, термин «целевой эффект» можно определить следующим образом

Целевой эффект – действие, приводящее к нужным результатам, определенной цели.

Достижение целевого эффекта любой операции (мероприятия) неизбежно связано с исследованием различных аспектов. Так, например, согласно [162], качество ЦНП, характеризующего результаты операции, включает в себя три аспекта:

1. Результативность, характеризуемая ее целевым эффектом (качество воздействия), получаемого в ходе операции.

2. Ресурсоемкость, характеризуемая количеством расходов операционных ресурсов (всех видов), необходимых для получения целевого эффекта. Расход операционных ресурсов характеризуется объемами израсходованных на получение целевого эффекта ресурсов (например, количество реагента, количество топлива, потраченного на его доставку, расход ресурсов на диспергирование реагента, количество топлива, потраченного на его доставку, затраты на амортизацию технологического оборудования: самолет, генератор, аппаратура, операторы и др.).

3. Оперативность процесса, характеризуемая расходом операционного времени – это длительность периода проведения операции по воздействию на облака (например, сумма времени, затраченного на проведение всех фаз операции по воздействию (в частности, рассеяния облака)

Из вышеизложенного следует, что качество операции не может быть охарактеризовано ни одним из перечисленных частных (единичных) свойств ее результатов в отдельности, а определяется их совокупностью – комплексом, включающим в себя три группы компонент (минимум три компонента) [217]:

$$Y_{\langle n \rangle} = Y_{\langle 3 \rangle} = \langle Y_{\langle n_1 \rangle}^{(1)}, Y_{\langle n_2 \rangle}^{(2)}, Y_{\langle n_3 \rangle}^{(3)} \rangle, \quad (5.1)$$

Распишем более подробно приведенные выше вектора $Y_{\langle n_1 \rangle}^{(1)}, R_{\langle n_2 \rangle}^{(2)}, T_{\langle n_3 \rangle}^{(3)}$.

$$Y_{\langle n_1 \rangle}^{(1)} = \langle Y_1^{(1)}, Y_2^{(2)}, \dots, Y_{n_1}^{(1)} \rangle = \langle \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_{n_1} \rangle, \quad (5.2)$$

- где $Y_1^{(1)} = \nu_1 = l_{1R}$ – длина зоны рассеяния облака;
- $Y_2^{(1)} = \nu_2 = l_2$ – ширина зоны рассеяния облака;
- $Y_3^{(1)} = \nu_3 = h$ – толщина зоны рассеяния облака;
- $Y_4^{(1)} = \nu_4 = \tau$ – длительность существования зоны рассеяния облака;
- $Y_5^{(1)} = \nu_5 = l_{л.з.}$ – длина линии засева;
- $Y_6^{(1)} = \nu_6 = l_{шир.зоны крист.}$ – ширина зоны кристаллизации от одной линии засева;

$$Y_7^{(1)} = \nu_7 = l_{\text{л.з.}} \quad - \text{длина линии засева.}$$

$$Y_{\langle n_2 \rangle}^{(2)} = \langle Y_1^{(2)}, Y_2^{(2)}, \dots, Y_{n_2}^{(2)} \rangle = \langle r_1, r_2, \dots, r_{n_2} \rangle, \quad (5.3)$$

где $Y_1^{(2)} = r_1$ – расход химического реагента;
 $Y_2^{(2)} = r_2$ – расход топлива;
 $Y_3^{(2)} = r_3$ – расход ресурсов на этапах сбора, обработки метеорологической информации и доведения ее до потребителя;
 $Y_4^{(2)} = r_4$ количество ЛА, используемых для модифицирования облака.

$$Y_{\langle n_3 \rangle}^{(3)} = \langle Y_1^{(3)}, Y_2^{(3)}, \dots, Y_{n_3}^{(3)} \rangle = \langle \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n \rangle, \quad (5.4)$$

где $Y_1^{(3)} = \tau_1$ – длительность процесса работы ЛА для доставки ХР к облаку;
 $Y_2^{(3)} = \tau_2$ – длительность перемещения модифицированной области облака к месту назначения (в заданную область);
 $Y_3^{(3)} = \tau_3$ – длительность периода диспергирования химического реагента.

Если внутри аспектов возможно свертывание, то показатель качества ЦНП функционирования системы принимает симплексную форму

$$Y_{\langle n \rangle} = Y_{\langle 3 \rangle} = \langle Y^{(1)}, Y^{(2)}, Y^{(3)} \rangle = \langle Y_1, Y_2, Y_3 \rangle \stackrel{d}{=} \langle \nu, r, \tau \rangle, \quad (5.5)$$

где $Y_1 = \nu$ – показатель целевого эффекта;
 $Y_2 = r$ – показатель расхода операционных ресурсов;
 $Y_3 = \tau$ – показатель расходов операционного времени.

Как показано в [217] (и, как подтверждается практикой), требования, предъявляемые к результатам операции, носят односторонний характер. Так, должны выполняться следующие условия

$$Y_1 \geq Y_2^{\text{TP}} = Z_1, \quad (5.6)$$

где Z_1 – минимально допустимое (требуемое) значение эффекта.

$$Y_2 \geq Y_2^{\text{TP}} = Z_2, \quad (5.7)$$

где Z_2 – максимально допустимое (предельное) значение расхода ресурсов

$$Y_3 \geq Y_3^{\text{TP}} = Z_3, \quad (5.8)$$

где Z_3 – максимально допустимая (предельная) длительность операции.

Тогда формула (5.1) примет вид:

$$P_{\text{дм}} = P(\hat{Y}_3 \geq Z_{\langle 3 \rangle}). \quad (5.9)$$

Для описания целевого эффекта решения задачи рассеяния облака рассмотрим более подробно параметры Z_1, Z_2, Z_3 .

Возможность получения целевого эффекта в значительной мере зависит от ряда факторов, среди которых можно выделить такие, как:

- разработка научных основ воздействия на облака;
- наличие методов воздействия на облака;
- наличие технических средств доставки и диспергирования химических реагентов для воздействия на облака;
- наличие химических реагентов для воздействия на облака;
- наличие способов применения методов, средств (технических и химических) воздействия на облака;
- результаты о практическом применении методов, средств и способов воздействия на облака;
- наличие методов и средств контроля за результатами воздействия на облака;

Раскроем приведенные выше положения. Анализ материалов по проблеме воздействия на облака и туманы позволяет сделать следующие выводы [3-7, 63, 103, 120-122]:

1. К настоящему времени разработаны теоретические основы методов воздействия на облака и туманы и, прежде всего, переохлажденных.

2. Существующие методы воздействия на переохлажденные облака и туманы весьма разнообразны, но на практике применяется в основном химический метод, предусматривающий применение различных химических реагентов.

3. Основными химическими реагентами для воздействия на переохлажденные облака (туманы) на современном этапе в нашей стране являются:

- хладореагенты (твердая углекислота, жидкий азот);
- кристаллизующие реагенты (йодистое серебро, ацетилацетонат меди, флороглюцин);

за рубежом (в частности, США):

- хладореагенты (твердая углекислота);
- кристаллизующие реагенты (йодистое серебро, йодистый свинец);
- кристаллогидраты газов (пропан).

4. Для диспергирования химических реагентов с целью воздействия на переохлажденные облака и туманы в России разработаны следующие авиационные средства, включающие самолеты: Ан-12, Ан-26, Ан-30М, Як-42Д, оснащенные соответствующими средствами для диспергирования химических реагентов (самолетные устройства КДС-155 для отстрела пиропатронов ПВ-50, самолетные устройства АСО-2И и УВ-26 для отстрела пиропатронов ПВ-26, самолетные пиротехнические генераторы, установленные на крыле самолета: самолетные горелки для сжигания ацетонового раствора льдообразующего реагента, закрепленные на фюзеляже самолета, самолетные аэрозольные генераторы САГ-ПМ-01 и САГ-26, многозарядная установка самолетного комплекса воздействия пиропатронами СКВ-УВ-26, самолетный азотный генератор ГМУЛ-А, установленный на борту самолета Ан-26, самолетная установка для диспергирования твердой углекислоты).

5. Существующие к настоящему времени способы воздействия на ПВОБЛ с помощью разработанных методов и технических средств воздействия сводятся в основном к наземному и самолетному.

6. Разработанные к настоящему времени методы, средства (химические и технические) и способы воздействия на переохлажденные облака и туманы прошли

широкую экспериментальную проверку не только в полевых условиях, но и при проведении крупномасштабных работ над крупными городами (Москва, Санкт-Петербург, Казань, Алматы, Ташкент) с целью рассеяния облаков и предотвращения выпадения осадков в интересах создания благоприятных метеорологических условий.

7. Проведенные к настоящему времени многочисленные (порядка нескольких сотен) натурные эксперименты по воздействию ПВОБЛ позволили получить критерии их пригодности к воздействию с определенной целью. В частности, пригодными к рассеянию считаются ПВОБЛ, обладающие следующими характеристиками [154-156]:

- толщина облачного слоя – не более 1000 м;
- фазовое состояние облака – капельное или смешанное;
- средняя температура облака – не выше минус 3°С.

Наличие в настоящее время методов и средств воздействия на облака и туманы, и прежде всего переохлажденных (см. пункт 1.2), а также разработка критериев пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к воздействию с различными целями (вызывание искусственных и интенсифицирование естественных осадков, рассеяние и стабилизация облачного покрова [154-156]) обусловили необходимость проведения исследований по получению количественных оценок пригодности ПВОБЛ к воздействию в различных ФГР.

Анализ литературных источников по данному вопросу показал, что к настоящему времени в отечественной литературе имеет ряд работ, содержащих сведения о пригодности к рассеянию облачного покрова ПВОБЛ применительно к районам Украины [154-156], Арктики [158], ЕТР [195-198]. Вместе с тем, в отношении выбранного в диссертации района аналогичные работы в литературе соответствуют.

Исходя из этого в настоящей работе получены количественные оценки пригодности к рассеянию ПВОБЛ над выбранными районами. Приведенные в диссертации оценки пригодности ПВОБЛ к воздействию получены с использованием критерия пригодности, приведенного выше (раздел 3 диссертации), и отнесены к случаям использования в качестве химического реагента твердой углекислоты. Случаи многослойных облаков, когда один слой был пригоден к рассеянию, а другой нет, из рассмотрения исключались.

Данные о повторяемости пригодных к рассеянию переохлажденных ВОБЛ над центральным районом ЕТР приведены на рисунках 3.3 и 3.4 в п. 3.1 настоящей диссертации. Анализируя эти данные, можно сделать следующие выводы:

во-первых, наибольшие значения повторяемости пригодных к рассеянию переохлажденных ВОБЛ (с осадками и без осадков) наблюдаются в январе (87,0%) и феврале (87,5%), наименьшие – в ноябре (61,6%). В целом переохлажденные ВОБЛ пригодны к засеву с целью их рассеяния зимой в 81,8% случаев, в холодное полугодие – в 78,9% случаев;

во-вторых, выявленные выше тенденции в распределении значений повторяемости пригодных к рассеянию ВОБЛ в полной мере относятся также и к облакам с осадками и без осадков. Так, наиболее часто пригодные к рассеянию переохлажденные ВОБЛ с осадками и без осадков наблюдаются в январе (84,4 и 88,4%) и феврале (89,7 и 86,3%) менее всего они пригодны в ноябре (69,8 и 58,5% соответственно).

В целом за зиму и холодное полугодие величина повторяемости пригодны к рассеянию ВОБЛ с осадками и без осадков остаются довольно высокими (85,3 и 80,2%; 82,0 и 75,2% соответственно).

Таким образом, на основании полученных в настоящей работе данных о пригодности переохлажденных ПВОБЛ к воздействию можно делать вывод о том, что наиболее благоприятные условия для рассеяния ПВОБЛ наблюдаются над центральным районом ЕТР в месяцы холодного полугодия и, особенно, зимой. При этом в половине случаев рассеивать придется, как правило, всего один слой облаков, что значительно повышает успех воздействия, снижает расход реагентов и потребный наряд сил и средств, а также повышает вероятность достижения поставленной задачи.

Приведенные в данном разделе результаты имеют большое практическое значение, поскольку они позволяют, не проводя натурных экспериментов, сделать выводы о необходимости и целесообразности проведения работ по воздействию на облака в том или ином ФГР. Кроме того, полученные в работе данные могут быть использованы при планировании, подготовке и проведении мероприятий, связанных с воздействием на облака с целью их рассеяния для решения широкого круга прикладных задач.

Принимая за меру результативности операции по воздействию на переохлажденные ВОБЛ оценки пригодности ее к рассеянию, можно сделать следующий вывод: наиболее благоприятные условия для их рассеяния наблюдаются над центральным районом ЕТР в месяцы холодного полугодия и, особенно, зимой.

Таким образом, результативность проведения операции по рассеянию переохлажденных ВОБЛ, будет определяться сезоном и физико-географическим районом.

Кроме результативности, за меру которой в диссертации принимаются оценки пригодности ее к рассеянию, для более объективного оценивания результатов проводимых работ целесообразно также рассматривать и такие показатели как оперативность и ресурсоемкость.

Оперативность проведения мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков в интересах проведения поисково-спасательных работ

Необходимость проведения ПСР в различных ФГР нашей страны обусловлена участвовавшими в последние годы случаями аварий и катастроф с летательными аппаратами (самолета, вертолета, в том числе и находящимися в частной собственности), поиска рыболовов на оторвавшихся льдинах, заблудившихся лыжников, туристов.

В случае отсутствия облачности над районом проведения поиска в настоящее время широко используются современные технические средства наблюдения, в первую очередь, авиационные. В простых метеоусловиях задача проведения ПСР решается достаточно успешно, а время ее решения определяется в основном размерами района поиска.

Иная картина имеет место при неблагоприятных метеорологических условиях, когда над районом проведения ПСР наблюдается сплошная низкая облачность. В этом случае могут приниматься решения как об отмене проведения ПСР, так и о проведении мероприятий по рассеянию переохлажденных ВОБЛ в интересах проведения поиска.

В первом случае время задержки будет определяться временем нахождения волнистообразных облаков над районом поиска, которое может изменяться от 10-12 часов до 2-3 суток (48-72 часа).

При подготовке и проведении мероприятий по рассеянию ВОБЛ в интересах проведения ПСР общее время будет включать в себя:

- время, затраченное на подготовку первого этапа мероприятий по модифицированию облаков (время на принятие решения о проведении воздействия на облака, работу расчетно-аналитической группы, подготовку самолета к вылету, доведения указаний до соответствующей группы (1 час);
- время на полет самолета к району проведения ПСР и проведение рассеяния облаков (2 часа);
- время на проведение рассеяния облаков (1 час);
- время на возврат самолета на базу (аэродром) (1,5 часа);

Следовательно, общее время на подготовку и проведение мероприятий по подготовке и проведению рассеяния ВОБЛ и проведение ПСР составит порядка 6-7 часов.

Сравнивая это время с продолжительностью нахождения облаков над районом ПСР (от 10-14 до 48-72 часа), можно сделать вывод, что оперативность проведения ПСР с помощью применения средств рассеяния ВОБЛ может быть повышена в условиях наличия облачности в среднем от 1,5-2 до 7-10 раз.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение средств воздействия для рассеяния переохлажденных облаков, рассмотренных в 1 главе диссертации, может существенно (в разы) повысить оперативность осуществления ПСР в условиях наличия облаков как при единичном случае (в течение одного дня), так и в случае их длительного использования (в течение месяца, сезона, полугодия). Иными словами, оперативность проведения ПСР в условиях наличия волнистообразных облаков вполне очевидна.

Ресурсоемкость мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков в интересах проведения поисково-спасательных работ

Расчет стоимости работ по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков проведем на примере решения задачи проведения ПСР при следующих исходных данных. Дата проведения ПСР – 8 января 2017 года в период с 14.00 до 15.00 часов по московскому времени. Требуемое время поддержания зоны в раскрытом от волнистообразных облаков состоянии составляет 60 мин, а требуемая площадь зоны рассеяния от облаков – $S=10 \text{ км} \times 4 \text{ км}=40 \text{ км}^2$.

Согласно прогнозу погоды, в день проведения работ по рассеянию облаков будут находиться переохлажденные ВОБЛ с вертикальной протяженностью порядка 400 метров. Средняя температура облачного слоя будет составлять минус 10°C , высота нижней границы облаков – порядка 100 метров. Остальные исходные данные будут составлять:

- v_0 – скорость воздушного потока на уровне засева облаков химическими реагентами, 30 км/ч;
- v_1 – скорость полета самолета, проводящего засев облаков химическими реагентами, 300 км/ч;
- T_1 – время полета самолета от аэродрома базирования до района проведения ПСР, 1 ч;
- T_3 – время полета самолета от района проведения операции по рассеянию облаков до аэродрома базирования, 1 ч;

T_2 – время засева облаков химическими реагентами с целью рассеяния облачного покрова.

Время T_2 будет определяться временем, необходимым для нахождения района проведения ПСР в состоянии, раскрытым от облаков $t_{тр}$, и запасом времени, необходимым для страховки ($t_{запас}$). Тогда

$$T_2 = t_{тр} + t_{запас} \quad (5.10)$$

Промежуток времени $t_{запас}$ определим, равным 60 мин или 1 ч. Это время необходимо для полного рассеяния засева облаков химическими реагентами на определенном расстоянии от расчетной линии рубежа засева и полета самолета из зоны рассеяния к заданному краю района проведения ПСР.

Сделаем несколько замечаний относительно ряда входящих в уравнение (4.3, 4.4 гл. 4) величин. В частности, в ходе проведенных натуральных экспериментов по рассеянию переохлажденных ВОБЛ установлено, что ширина зоны от одной линии засева химическими реагентами (в частности, твердой углекислоты) (зоны кристаллизации) составляет в среднем $L_{ш.крист.} = 3,5$ км (возьмем $L_{ш.крист.} = 3,5$ км), а время на разворот самолета равно $t_p = 2$ мин или $t_p = 1/30$ ч.

В случае использования в качестве химического реагента твердой углекислоты (CO_2) расход ее на один километр полета самолета составляет, в зависимости от вертикальной протяженности волнистообразных облаков.

В случае использования в качестве химического реагента твердой углекислоты (CO_2) расход ее на один километр возьмем для нашего случая ($\Delta H=300$ м) несколько больше, чем по рекомендованным в таблице данным, т.е. не $m_{CO_2} = 350$ г/кг, а $m_{CO_2} = 450$ г/км.

С учетом времени на разворот самолета (t_p) время нахождения самолета на линии засева будет определяться уже не величиной t , а величиной $(t - 2t_p)$. Следовательно, длина линии засева ($L_{л.з.}$) будет определяться уже не выражением (4.26), а выражением (4.29).

Расход топлива (керосина) в час для самолета АН-12 составляет в среднем $M_{топл./ч} = 2,3$ т/ч. Стоимость топлива (керосина) будет равным 30 тыс. руб. за тонну, т.е. $C_p = 30$ руб./кг. Стоимость реагента (CO_2) определялась как 7000 руб. за тонну, т.е. $C_{CO_2} = 7$ руб./кг.

Поскольку общее время работы самолета для осуществления операций по рассеянию волнистообразных облаков будет составлять порядка 4 часов, то, очевидно, что потребуется один самолет. В этом случае с учетом времени на разворот самолета длина линии засева $L_{л.з.}$ будет равна

$$L_{л.з.} = v_c \left(\frac{L_{ш.крист.}}{v_0} - 2t_p \right) = 300 \text{ км/ч} \left(\frac{3 \text{ км}}{30 \text{ км/ч}} - 2 \frac{1}{30} \right) = 15 \text{ км} \quad (5.11)$$

Тогда с учетом ширины зоны рассеяния от одной линии засева, равной 3,5 км, общая площадь зоны рассеяния будет составлять

$$S_{зоны \text{ раскр.}} = L_{л.з.} \cdot L_{шир. \text{ зоны \text{ расс.}}} = 15 \text{ км} \cdot 3,5 \text{ км} = 52,5 \text{ км}^2 \quad (5.12)$$

Величина $S_{\text{зоны раскр.}}$ будет составлять будет больше требуемой зоны рассеяния ($S_{\text{тр.}} = 40 \text{ км}^2$).

Практика работ по рассеянию облаков показала, что стоимость оплаты аренды самолета ($C_{\text{ар.сам.}}$) будет составлять порядка 100 тыс./ч, а стоимость эксплуатации наземных служб ($C_{\text{наз.сл.}}$) определим равной 20 тыс./ч. Тогда стоимость операции по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков на площади более 40 км² с помощью одного самолета, согласно (4.39), будет составлять

$$C_{\text{оп}} = \frac{7 \text{ руб.}}{\text{кг}} \cdot \frac{(1 \text{ ч} + 1 \text{ ч}) \frac{30 \text{ км}}{\text{ч}}}{3 \text{ км}} \cdot \frac{300 \text{ км}}{\text{ч}} \left(\frac{3,5 \text{ км}}{30 \text{ км}} - 2 \frac{1}{30} \text{ ч} \right) \cdot \frac{0,35 \text{ кг}}{\text{км}} +$$

$$+ \frac{2300 \text{ кг}}{\text{ч}} \cdot \frac{(1 \text{ ч} + 2 \text{ ч} + 1 \text{ ч})}{\text{км}} \cdot \frac{30 \text{ руб.}}{\text{кг}} + 1 \frac{100 \text{ тыс.}}{\text{ч}} \cdot 4 \text{ ч} + 4 \text{ ч} \cdot \frac{20 \text{ тыс.}}{\text{ч}} = 759,5 \text{ тыс. руб}$$
(5.13)

Из анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что основной вклад в стоимость операции по рассеянию волнистообразных облаков вносит плата за топливо (керосин) – 276 тыс. руб. и аренда самолета 400 тыс. руб. Однако следует отметить, что расчеты производились по коммерческим ценам. В случае использования штатных средств МЧС России стоимость мероприятий будет значительно (на порядок) ниже. Это связано с тем, что стоимость топлива, аренды самолета и оплата услуг наземных служб будет определяться уже не коммерческими ценами, а исходя из реальной стоимости затрат, связанной с обслуживанием штатных технических средств МЧС России.

Поскольку при воздействии на облака используются химические реагенты и их рецептуры, возникает необходимость в проведении исследований, связанных с оцениванием экологичности применяемых химических средств, результаты такого исследования приведены ниже.

Экологические аспекты мероприятий по воздействию на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака

Расширение объема и географии работ по воздействию на облака и туманы обуславливает необходимость проведения исследований, связанных с оцениванием экологических последствий применением химических реагентов и их рецептур. Особую актуальность такие исследования приобретают для районов проведения мероприятий по метеозащите мегаполисов, к которым, несомненно, относится и Москва. Подтверждением этому являются публикации в данной области, появившиеся в последние годы [49, 219-221].

Исходя из вышеизложенного ниже представлены результаты обобщения и анализа исследований по вопросу оценивания экологических аспектов мероприятий по воздействию на переохлажденную облачность с включением в них также и собственных выводов.

Известно, что основными химическими реагентами, которые применяются в последние два десятилетия в работах по воздействию на переохлажденные облака и туманы являются йодистое серебро (AgI), твердая углекислота (CO₂) и жидкий азот (N₂).

Высокая льдообразующая активность AgI (при сгорании грамма пиротехнических смесей, содержащих 8% йодистого серебра, выход активных ядер кристаллизации при температуре воздуха минус 10°C составляет не менее $5 \cdot 10^{12}$ частиц), позволяет его использовать как один из основных реагентов для засева облаков. Высокая активность AgI объясняется близостью его кристаллической структуры к структуре льда.

Для засева облаков йодистым серебром с помощью самолетов российскими предприятиями выпускаются пиропатроны двух типов: ПВ-50-М калибра 50мл и ПВ-26-01 калибра 26 мг. Технические характеристики указанных пиропатронов приведены в таблице 5.1 [5].

Таблица 5.1

Технические характеристики отечественных пиропатронов.

Характеристики пиропатронов	Тип пиропатрона	
	ПВ-50-М	ПВ-26-01
Масса пиропатрона, г	300	33
Время горения, с	35	40
Длина трассы дымления, м	2500	1500
Время задержки начала дымления, с	8	1800
Трасса задержки, м	450	Нет
Выход льдообразующих ядер с пиропатроном при температуре минус 10°C	$\geq (5 \cdot 10^{12})$	$\geq (5 \cdot 10^{12})$

Расход пиропатронов при воздействии на волнистообразные облака составляет, как правило, несколько штук на километр полета самолета. При этом ширина засеянной полосы увеличивается до 3-4 км [154-156].

Повышенное внимание к реагентам на основе AgI связан с тем, что это вещество, а также йод, содержащийся в продуктах сгорания пиротехнических смесей, в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 относится ко 2-му классу опасности. Йодистое серебро практически не растворяется в воде, однако постоянное присутствие в атмосфере аммиака, соединений цинка, сульфатов приводят к быстрому разложению AgI, вследствие чего в водной среде всегда имеются не связанные ионы серебра и йода.

Исследованиями установлено, что концентрация серебра в воздухе в сезоны градовых работ на Северном Кавказе составляла в среднем от $6,4 \cdot 10^{-5}$ до $8,3 \cdot 10^{-5}$ мкг/м³, в Молдавии – 0,001-0,043 мкг/м³, что на несколько порядков меньше предельно допустимой концентрации (ПДК=10 мкг/м³) [222]. Экспериментальные данные указывают, что таким образом серебро в свободной атмосфере обнаруживается на расстоянии 100 км от районов воздействия в направлении переноса засеянных реагентами облаков.

Серебро и его соли малотоксичны, однако известно их угнетающее действие на некоторые виды бактерий и микроорганизмов. При продолжительном контакте с солями серебра у человека могут наблюдаться расстройства общего самочувствия. Несмотря на низкую растворимость йодистого серебра, вследствие наличия в атмосфере аммиака, цинка и серной кислоты (50-70% сульфатов в атмосфере находится в виде серной кислоты) его растворимость увеличивается. Это обстоятельство, в свою очередь, дает возможность определить концентрации ионов, в частности, йода, в атмосферных осадках. Интерес к изучению содержания йода в атмосферных осадках объясняется тем, что он играет немаловажную роль в жизнедеятельности животного мира и человека.

Полученные к настоящему времени оценки свидетельствуют о том, что концентрация йода в осадках, выпавших из облаков, подвергнутых воздействию, в 1,5-2 раза выше, чем в осадках из естественных облаков и составляет: в дни с воздействиями – 0,001 мкг/л, без воздействия – 0,0015 мкг/л. Исследования концентрации серебра в дождевой воде из засеянных облаков проводились в США. Например, такие работы были выполнены в период 1973-1975 гг. во Флориде. Результаты наблюдений за концентрацией серебра в дождевой воде обнаружили значительно более высокие концентрации в пробах при засеве, чем без него. Концентрация серебра в пробах, однако, достаточно низка, чтобы приводить к риску загрязнения окружающей среды, по крайней мере, при такой интенсивности засева, как во Флориде.

Исследования концентрации серебра в почве на северо-востоке шт. Висконсин в июле-августе 1977 года позволили сделать следующий вывод. Естественные концентрации серебра, а также концентрации, обусловленные применением йодистого серебра, чрезвычайно низки и не представляют прямой опасности ни для человека, ни для экосистем в целом. Специальные исследования показали, что при воздействии йодистым серебром хотя и происходит накопление серебра в верхнем слое почвы, однако применение этого реагента даже в течение 100 лет не принесет существенного вреда флоре и фауне [223].

В ходе работ по воздействию на облака и туманы в мире ежегодно расходуется до 10 т AgI. Для сравнения можно указать, что природные источники поступления серебра в атмосферу оцениваются примерно как 70 т/год, антропогенные – 2290 т/год [36]. Сирийский проект по увеличению осадков является наиболее масштабным из всех известных в настоящее время. Сезонный расход йодистого серебра в этом проекте составляет более 81 кг при площади работ 150 тыс. км² [221].

Для оценки нагрузок AgI на окружающую среду при проведении работ по искусственному увеличению осадков в таблице 5.2 приведены сравнительные данные по воздействию на облака в Сирии, Иране и Якутии [5].

Таблица 5.2

Сравнительная характеристика расхода AgI в разных проектах по искусственному увеличению осадков

Страна, регион	Годы реализации проектов	S , тыс. км ²	N	Q , г	q , г/км ²
Сирия	1992-1997	150	35	81759	0,545
Иран	1999-2001	125 (1999 г.)	31	13432	0,107
		280 (2000 г.)	-	15394	0,055
		385 (2001 г.)	-	17849	0,046
Якутия	1995-1997	1500	9	7337	0,005
	2003-2005	-	-	-	-

Таким образом, ежегодно количество AgI, рассеянного в слое атмосферы от 2 до 5 км в районе проведения воздействий, составляло в среднем 0,545 г/км². В других проектах по искусственному увеличению осадков расход AgI был еще меньше.

В связи с этим можно утверждать, что изменение природного фона содержания серебра, с точки зрения его накопления и отрицательного воздействия на объекты природной среды при работе по воздействию на облака с использованием современных

пиротехнических составов при реализации отечественных технологий отсутствует йод широко известен и распространен в природе, являясь одним из жизненно важных химических элементов.

В отношении использования твердой углекислоты можно отметить следующее. Являясь по природе действия хладореагентом, CO_2 не содержит внутри себя никаких посторонних частиц. Следовательно, никаких загрязняющих примесей ни в атмосфере, ни на подстилающей поверхности или водоеме можно не ожидать. Поэтому даже широкомасштабное применение в экспериментах этого реагента вряд ли может вызвать какие-либо негативные в экологическом плане последствия.

Засев переохлажденных ВОБЛ целесообразно осуществлять путем дозированного сброса в облако гранул CO_2 размеров не более 0,2-0,4 см (в противном случае будет наблюдаться перерасход реагента [100] при пролете самолета над верхней границей засеваемого слоя). При использовании твердой углекислоты расход реагента составляет от 0,15 до 1,0 кг на 1 км трассы самолета [154-156].

Применение жидкого азота N_2 (температура кипения минус 196°C) также основывается на использовании его низкой температуры для создания зон глубокого охлаждения облачной среды с целью спонтанного образования в них кристаллов льда (но не ледяных кристаллов). Выход кристаллов льда с 1 г жидкого азота составляет порядка 10^{13} . В отличие от засева гранулами твердой углекислоты образование кристаллов льда под действием N_2 происходит вдоль трассы полета самолета, поэтому на практике такой метод используют преимущественно для засева относительно тонких переохлажденных облачных слоев, например, для их рассеяния или как дополнительное средство при использовании AgI или CO_2 . Существенными достоинствами засева облаков с использованием жидкого азота является его наиболее высокий среди всех реагентов температурный порог действия (минус $0,5^\circ\text{C}$) и экологичность [5].

Экологическая безопасность применения в работах по рассеянию переохлажденных ВОБЛ с помощью хладореагентов очевидна. При использовании CO_2 и N_2 происходит их переход в газообразное состояние и смешение с атмосферным воздухом, природными составляющими, которого они являются. Содержание данных газов в общем составе сухого воздуха оценивается как 0,033 и 78% соответственно, поэтому даже при максимальном введении в облако, например сухого льда, увеличение концентрации диоксида углерода в атмосфере составляет менее 10^{-9} от его поступления от природных и 10^{-6} от антропогенных источников [221].

Факт влияния особо повышенных концентраций свинца в окружающей среде, особенно в пищевых цепочках, на здоровье населения не вызывает сомнения. Токсичность свинца в совокупности с его особенностью аккумулировать в почве, воде обусловлено появлением запрета на его применение в нашей стране в практике работ по воздействию наоблака. В целях защиты регионов от возможных перегрузок по свинцу, с 1985 года данный реагент (йодистый свинец PbI_2) из пиропатронов был изъят [222].

Таким образом, на основании приведенных выше данных можно сделать вывод о том, что при проведении работ по рассеянию волнистообразных облаков (равно как и по искусственному вызыванию осадков из них) загрязнение компонентов природной среды (атмосферы, водоемов, почвы, территорий) вносимых в облака реагентами чрезвычайно мало, и отрицательные последствия проведения такого рода работ наблюдаться не будут.

5.3. Техничко-экономические требования к методам и средствам воздействия на переохлажденные облака различных форм

Опыт работ по воздействию на облака убедительно показал, что успех воздействия, помимо наличия благоприятных синоптико-климатических условий, в значительной мере определяется характеристиками средств воздействия, включая и химические средства.

Химические средства – химические реагенты и их рецептуры, с помощью которых осуществляется воздействие на облака и туманы. Химические средства являются составной частью средств воздействия на облака и туманы.

Химические реагенты (ХР) – вещества-реагенты (катализаторы или ингибиторы), используемые для воздействия на облака.

Известно, что используемые в работах по воздействию на облака и туманы химические реагенты обладают различной активностью.

Активность ХР – свойство реагента, проявляющееся в его способности активизировать какой-либо процесс в среде его применения.

Практика работ по воздействию на облака также показала, что в зависимости от температуры воздуха применяемые реагенты могут быть различными. Так, например, при положительных значениях температуры воздуха целесообразно применять гигроскопические реагенты.

Гигроскопические реагенты (ГР) – химические вещества, способные поглощать водяной пар из атмосферы при значениях относительной влажности воздуха меньше 100%.

В зависимости от цели воздействия ввод ХР может быть осуществлен либо в безоблачную атмосферу с целью создания искусственных атмосферных образований, либо в естественные облака или туманы с целью их стабилизации или, напротив, рассеяния и вызывания (интенсифицирования) осадков. Следует отметить, что в этом случае речь идет о воздействии на называемые «теплые облака», то есть на облака, наблюдающиеся в атмосфере при положительных значениях температуры воздуха.

При отрицательных значениях температуры воздуха необходимо применять льдообразующие реагенты.

Льдообразующие реагенты (ЛОР) – вещества-реагенты, при внесении которых в объекты воздействия (облака, туманы), в последних образуются ледяные кристаллы или кристаллы льда. К ЛОР относятся: кристаллизующие реагенты (например, йодистое серебро), хладореагенты (например, твердая углекислота), кристаллогидраты газов (пропан), биореагенты.

Кристаллизующие вещества (КР) – реагенты, при внесении которых в переохлажденные облака и туманы (наблюдаются при отрицательных значениях температуры воздуха) либо в безоблачные слои атмосферы с пересыщением по отношению ко льду в последних появляются ледяные кристаллы гетерогенного происхождения. К КР относятся: йодистое серебро, сернистая медь, металдегид, флороглюцин и др.

Хладореагенты (ХР) – реагенты, при внесении которых в ПОТ либо в безоблачные слои атмосферы с пересыщением по отношению ко льду в последних появляются кристаллы льда гомогенного происхождения. К ХР относятся твердая углекислота и жидкий азот.

Биореагенты – реагенты биогенного происхождения (штаммы растений, споры, фитопланктон и др.), при внесении которых в ПОТ в последних образуются ледяные кристаллы.

Льдообразующие реагенты характеризуются, как правило, двумя показателями: пороговой температурой льдообразования и льдообразующей активностью.

Пороговая температура льдообразования (ПТЛ) – значение температуры, при котором начинается образование ледяных кристаллов или кристаллов льда в ПОТ при внесении ЛОР.

Льдообразующая активность реагента (ЛАР) – способность реагента к образованию кристаллов льда или ледяных кристаллов. Показателем активности является число ледяных кристаллов (кристаллов льда), образующихся из грамма реагента при определенной температуре воздуха. Для каждого реагента характерна определенная (своя) активность.

Вместе с тем, проведенный в работе анализ применяемых в настоящее время для воздействия на переохлажденные ВОБЛ льдообразующих реагентов позволил сделать вывод о том, что применительно к тематике диссертационных исследований целесообразно использование кристаллообразующих реагентов, а именно йодистого серебра (AgI), твердой углекислоты (CO₂) и жидкого азота (N₂). Следует отметить, что этим реагентам (а также и цементу, используемому в качестве реагента для воздействия на конвективные облака) присущи как достоинства, так и недостатки (таблица 5.3) [3-7, 103, 136, 137].

Приведенные в таблице 5.3 сведения о достоинствах и недостатках применяемых в настоящее время химических реагентов для воздействия на облака и туманы необходимо учитывать при обосновании технико-экономических требований к перспективным методам и средствам воздействия на атмосферные облачные образования.

Таблица 5.3

Основные достоинства и недостатки химических реагентов, используемых в настоящее время для воздействия на переохлажденные облака

Реагент	Достоинства	Недостатки
Йодистое серебро (AgI)	<ul style="list-style-type: none"> - имеет большой выход активных частиц с 1 г реагента (при $t = \text{минус } 10^{\circ}\text{C}$) ($N = 10^{13} \text{ } \tilde{\text{a}}^{-1}$); - может применяться в пиротехнических составах; - имеет достаточно высокий порог кристаллизации (минус $4^{\circ}\text{C} \div \text{минус } 5^{\circ}\text{C}$); - проявляет большую льдообразующую активность при более низких температурах по сравнению с CO₂; - может сохранять в пиропатронах-генераторах льдообразующую активность длительное время; - не требует специальных условий для хранения. 	<ul style="list-style-type: none"> - высокая стоимость реагента; - способствует образованию ледяных кристаллов только в верхней части облака (в месте засева); - под действием света происходит потеря льдообразующей активности (дезактивации).

Реагент	Достоинства	Недостатки
Твердая углекислота (CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> - низкая стоимость реагента (порядка 7 тыс. руб. за тонну); - высокий температурный порог кристаллизации (до минус 3°C); - способность к образованию кристаллов льда при падении в облаках во всей его толщ;и; - экологически чистый реагент; - способна к применению как твердом, так и в жидком виде. 	<ul style="list-style-type: none"> - трудности, связанные с хранением (теряет до 10% веса за сутки); - сравнительно большой расход реагентов при работах на значительных облаках; - при воздействии на слабопереохлажденные облака (от минус 1 до минус 5°C) требуется увеличение (до 10 раз) расход реагента.
Жидкий пропан	<ul style="list-style-type: none"> - высокий температурный порог льдообразования (почти минус 0,5°C); - практическая неизменность выхода активных частиц с 1 г реагента в диапазоне температур от минус 1 до минус 10°C; - практически экологически чистый реагент; - возможность применения для воздействия как переохлажденных туманов, так и переохлажденных облаков. 	<ul style="list-style-type: none"> - возможность применения, главным образом, на маломощные переохлажденные облачные слои (в основном на волнистообразные, слоистые, слоисто-кучевые облака); - необходимость применения с помощью специальных устройств (дьюаров).
Цемент	<ul style="list-style-type: none"> - невысокая стоимость реагента; - возможность воздействия как на теплые, так и на переохлажденные конвективные облака; - отсутствие негативных экологических последствий при применении данного вещества. 	<ul style="list-style-type: none"> - возможность применения только на конвективные облака; - необходимость хранения в сухом месте из-за подверженности влиянию влажности воздуха.

В качестве же ГР предпочтение следует отдать таким реагентам, как мочевины, хлористый кальций, поваренная соль, либо их смесям. При использовании ГР, также как и в случае применения кристаллизующих реагентов, большое значение имеет активность реагентов. Для ГР она определяется, наряду с физико-химическими свойствами реагентов, также и его дисперсностью, т. е. размерами диспергируемых частиц.

Исходя из вышеизложенного, в таблице 5.4 приведены технико-экономические требования к методам и средствам воздействия на переохлажденную облачность (волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков), используемых для решения широкого спектра прикладных задач.

Технико-экономические требования к перспективным методам и средствам воздействия на переохлажденную облачность

Методы должны быть	Химические средства должны быть	
1. Позволяющими решать задачи воздействия на переохлажденную облачность с определенными целями 2. Физически обоснованными 3. Экономически доступными 4. Экологически безвредными	1. Экологически безвредными 2. Недефицитными 3. Экономически доступными 4. Применяемыми с помощью существующих и перспективных технических средств 5. Универсальными (по возможности)	
	Льдообразующие реагенты должны иметь	Гигроскопические реагенты должны иметь
	1. Температурный порог льдообразования – минус 3°C и выше 2. Размер частиц – не менее 0,001 мкм 3. Выход активных частиц с 1 грамма реагента – не менее 10^{12} - 10^{13}	1. Гигроскопическую точку – ниже 70% 2. Размер частиц – 0,01 мкм и менее 3. Выход частиц с 1г реагента – не менее 10^{12}
Самолеты		
Должны обеспечивать	Должны иметь	
1. Высоту подъема – 10-12 км 2. Дальность полета – 5-6 тыс. км. 3. Время полета – 7-10 часов	1. Баки с водой (растворами реагентов) емкостью 10-20 тонн 2. Генераторы для получения аэрозолей кристаллизующих и гигроскопических реагентов 3. Углекислотные и (или) пропановые установки 4. Генераторы для диспергирования жидкого азота	
Вертолеты		
Должны обеспечивать	Должны иметь	
1. Высоту подъема – 3-5 км 2. Время полета – 3-4 часа 3. Дальность полета – 300-1000 км	1. Баки с водой (растворами реагентов) емкостью 3-5 тонн 2. Генераторы (устройства) для диспергирования КР или ГР	

Необходимость обоснования требований к ГР обусловлена тем обстоятельством, что при воздействии на переохлажденные облака, имеющие «теплую» нижнюю часть для повышения результативности проводимых мероприятий может применяться комбинированный метод (засев верхней части облака кристаллизующими реагентами, а нижнюю – гигроскопическими).

Из анализа данных таблицы 5.4 следует, что разрабатываемые для воздействия на облака ХР должны удовлетворять как общим, так и специфическим требованиям, характеризующимся конкретными показателями.

Сформулированные выше требования к химическим реагентам, предназначенным для воздействия на переохлажденную облачность, могут быть использованы при проведении исследований по поиску и разработке новых химических и технических

средств для воздействия на облака как естественного, так и искусственного происхождения.

5.4. Метод определения водозапаса волнистообразных облаков без данных о водности

С развитием работ по воздействию на облака возникает необходимость в оценке их водозапасов в различных ФГР. Это обстоятельство выдвинуло требование получения эмпирических способов расчета средней водности и водозапасов по метеорологическим параметрам облачного слоя. Кроме того, в настоящее время нет теории, которая бы достаточно полно учитывала связь водности и водозапасов с метеорологическими величинами.

В настоящее время в литературе имеется ряд работ, в которых приведена графическая зависимость водозапаса от мощности и средней водности облаков. Однако эти графики, построенные вручную, относятся в основном к слоисто-дождевым и высоко-слоистым облакам, наблюдающимся над районами Украины [177]. Сведения об исследованиях связи между водозапасом ВОБЛ и параметрами облачного слоя в литературе практически отсутствуют.

Исходя из этого, в диссертационной работе разработан метод косвенного определения водозапасов облачных систем (слоистых, слоисто-кучевых) без данных о водности, по метеорологическим величинам. Для выбора наиболее тесно связанных с водозапасом метеорологических величин проведен корреляционный анализ и рассчитаны коэффициенты корреляции между водозапасом ВОБЛ и: мощностью, высотами нижней и верхней границ, температурами на этих границах, температурой у поверхности земли и др. Для проведения корреляционного анализа были использованы результаты сетевого СЗА, представленные в протоколах ТАЭ-7,7 м над Москвой за 1953-1964 гг. Всего обработано 1474 случая зондирования в холодное полугодие. Методика отбора зондирований с ВОБЛ заключалась в следующем. Из числа данных сетевого СЗА были отобраны случаи, когда наблюдались только слоистые (St) или слоисто-кучевые (Sc) облака количеством не менее пяти баллов, в которых была определена водность инструментальным методом (357 случаев). Исходя из этого, определялась начальная выборка данных для проведения корреляционного анализа [85].

Корреляционный анализ представляет собой совокупность методов статистической обработки результатов наблюдений, зависящих от различных одновременно действующих факторов, и предназначенных для анализа существенности влияния данных факторов на результаты наблюдений.

Сущность корреляционного анализа состоит в определении степени коррелированности результатов наблюдений с исследуемыми факторами и определении на этой основе существенности влияния данных факторов на результаты наблюдений.

Пусть, например, на результат наблюдения \hat{y} влияют некоторые факторы $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n$. При проведении корреляционного анализа предполагается, что и результат наблюдения, и факторы являются случайными и между ними возможно наличие стохастической связи, т.е.

$$y = f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n). \quad (5.14)$$

Как известно, характеристикой линейной стохастической зависимости между случайными величинами является коэффициент корреляции, оценка которого и позволяет судить о степени данной зависимости. Таким образом, корреляционный анализ представляет собой, по существу, совокупность методов исследования свойств системы случайных величин $|\hat{y}, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n|$.

При проведении корреляционного анализа выдвигается ряд предположений, основными из которых являются следующие:

1. Предполагается, что совокупность результатов наблюдений качественно однородна или, по крайней мере, может быть разделена на качественно однородные группы.

2. Предполагается, что стохастическая зависимость (5.14) имеет линейный или близкий к линейному характер.

Такой корреляционный анализ был проведен. Исследовались следующие параметры облачности и наземные данные:

P – водозапас облаков, [г/м²];

T_3 – температура воздуха у поверхности земли, [°C];

$H_{НГО}$ – высота нижней границы облаков, [км];

$T_{НГО}$ – температура на нижней границе облаков, [°C];

$H_{ВГО}$ – высота верхней границы облаков, [км];

$T_{ВГО}$ – температура на верхней границе облаков, [°C];

dH – мощность (высота) облачного слоя [км].

При вычислениях был использован следующий математический аппарат [224]:

$$r_{yx} = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - M_y^0)(x_i - M_x^0) \right] / \sigma_y \sigma_x, \quad (5.15)$$

где r_{yx} – оценка парного коэффициента корреляции между двумя параметрами \hat{y} и \hat{x} ;

M_y^0 – оценка математического ожидания

$$M_y^0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (5.16)$$

где n – объем выборки;

σ_y – оценка среднего квадратического отклонения

$$\hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - M_y^0)^2}. \quad (5.17)$$

Результаты исследований приведены в таблице 5.5.

Как видно из полученных результатов, наиболее тесно водозапас ВОБЛ связан с мощностью облаков, при этом коэффициент корреляции составляет 0,84. Со всеми остальными параметрами водозапас связан меньше, а коэффициенты корреляции составляют при этом от минус 0,17 (P и $H_{ВГО}$) до 0,33 (P и T_3). Также установлена значительная связь между температурными характеристиками (наземными и облачными): T_3 и $T_{НГО}$, T_3 и $T_{ВГО}$, $T_{ВГО}$ и $T_{НГО}$; коэффициенты корреляции составили при этом

от 0,46 до 0,80. Значительно коррелируют между собой также $H_{НГО}$ и $H_{ВГО}$, $H_{НГО}$ и dH , коэффициенты при этом составили 0,89 и минус 0,80. Эти данные могут быть использованы в дальнейших исследованиях по вопросу воздействия на ВОБЛ. Остальные полученные коэффициенты корреляции имеют слишком маленькие величины, что говорит об отсутствии связи между параметрами (признаками).

Таблица 5.5

Результаты корреляционного анализа облачных параметров и наземных данных для
холодного полугодия

Параметры	Коэффициенты корреляции
P и T_3	0,33
P и $H_{НГО}$	-0,29
P и $T_{НГО}$	0,26
P и $H_{ВГО}$	-0,17
P и $T_{ВГО}$	0,19
P и dH	0,84
T_3 и $H_{НГО}$	-0,36
T_3 и $T_{НГО}$	0,72
T_3 и $H_{ВГО}$	-0,43
T_3 и $T_{ВГО}$	0,46
T_3 и dH	-0,10
$H_{НГО}$ и $T_{НГО}$	-0,56
$H_{НГО}$ и $H_{ВГО}$	0,89
$H_{НГО}$ и $T_{ВГО}$	-0,58
$H_{НГО}$ и dH	-0,80
$T_{НГО}$ и $H_{ВГО}$	-0,52
$T_{НГО}$ и $T_{ВГО}$	0,80
$T_{НГО}$ и dH	-0,04
$H_{ВГО}$ и $T_{ВГО}$	-0,33
$H_{ВГО}$ и dH	0,25
$T_{ВГО}$ и dH	0,22

Таким образом, учитывая все вышеуказанное, косвенными параметрами (признаками) для определения водозапаса P могут являться dH и, в меньшей мере, T_3 . Для описания этой связи и возможности восстановления P по известным T_3 и dH необходимо построить уравнения линейной регрессии сначала для определения P от dH , а затем для определения P от dH и T_3 , после чего определить какое из них лучше, т.е. оценить полученные уравнения.

Для определения уравнений регрессии воспользуемся регрессионным анализом. В нем предполагается существование линейной зависимости результата наблюдений \hat{y} от n -факторов, т. е. модель определяется выражением

$$\hat{y} = a_0 + a_1\hat{x}_1 + a_2\hat{x}_2 + \dots + a_n\hat{x}_n. \quad (5.18)$$

В нашем случае это будут уравнения вида

$$\hat{y} = a_0 + a_1\hat{x}_1, \quad (5.19)$$

$$\hat{y} = a_0 + a_1\hat{x}_1 + a_2\hat{x}_2. \quad (5.20)$$

Результаты наблюдений P , dH и T_3 приведены в исходной выборке данных (200 значений на каждый параметр). Необходимо построить зависимости $P = f(dH)$ и $P = f(dH, T_3)$ в предположении, что они относятся к классу линейных функций.

Для уравнения (5.20) коэффициенты a_0 и a_1 определяются следующим образом

$$a_1 = \frac{\rho_{yx}}{\sigma_x} \frac{\sigma_y}{\sigma_x}, \quad (5.21)$$

$$a_0 = M_y^0 - a_1 M_x^0. \quad (5.22)$$

Здесь $\rho_{yx} = \rho_{PdH}$, $\sigma_y = \sigma_P$, $M_y^0 = M_P^0$, $M_x^0 = M_{dH}^0$, $\sigma_x = \sigma_{dH}$.

Таким образом, в результате расчетов уравнение (5.23) приняло следующий вид

$$P = -10,5 + 301,3dH. \quad (5.23)$$

Чтобы определить эту зависимость сначала вычисляем данные, необходимые для проведения анализа

M_P^0 , M_{dH}^0 , $M_{T_3}^0$ – оценки математического ожидания исследуемых величин (см. формулу (5.16));

σ_P , σ_{dH} , σ_{T_3} – оценки средних квадратических отклонений (вычисляются по формуле (5.17));

ρ_{PdH} , ρ_{PT_3} , ρ_{dHT_3} – парные коэффициенты корреляции (рассчитываются по формуле (5.16));

Пусть $\rho_{PdH} = A$, $\rho_{PT_3} = B$, $\rho_{dHT_3} = C$, тогда система нормальных уравнений может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \beta_1 + C = A; \\ C\beta_1 + \beta_2 = B. \end{cases} \quad (5.24)$$

Решаем систему с помощью определителей

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & C \\ C & 1 \end{bmatrix}, \quad \Delta_1 = \begin{bmatrix} A & C \\ B & 1 \end{bmatrix}, \quad \Delta_2 = \begin{bmatrix} 1 & A \\ C & B \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

откуда

$$\beta_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad (5.26)$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (5.27)$$

коэффициенты a_1 , a_2 и a_0 будут

$$a_1 = \beta_1 \frac{\hat{\sigma}_{\hat{P}}}{\hat{\sigma}_{dH}}; \quad (5.28)$$

$$a_2 = \beta_2 \frac{\hat{\sigma}_{\hat{P}}}{\hat{\sigma}_{T_3}}; \quad (5.29)$$

$$a_0 = M_{\hat{P}}^{\%} - a_1 M_{dH}^{\%} - a_2 M_{T_3}^{\%}. \quad (5.30)$$

Таким образом, уравнение регрессии будет иметь вид:

$$P = 2,34 + 282,12dH + 7,56T_3. \quad (5.31)$$

Для проверки качества полученных уравнений воспользуемся результатами контрольной выборки ($n=157$) и найдем среднеарифметическую $\bar{\Delta}$ и среднеквадратическую ошибку $\bar{\Delta}^2$ для них

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{\text{рас.}} - P_{\text{фак.}})i, \quad (5.32)$$

$$\bar{\Delta}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{\text{рас.}} - P_{\text{фак.}})^2 i, \quad (5.33)$$

где $P_{\text{рас.}}$ – рассчитанные по (5.31) и (5.23) значения водозапасов;

$P_{\text{фак.}}$ – фактические значения водозапасов.

Пусть для (5.23) $\bar{\Delta} = \bar{\Delta}_1$, $\bar{\Delta}^2 = \bar{\Delta}^2_1$, а для (5.31) $\bar{\Delta} = \bar{\Delta}_2$, $\bar{\Delta}^2 = \bar{\Delta}^2_2$. В результате расчетов оказалось, что

$$\bar{\Delta}_1 = 16,57, \text{ т.е. } |\bar{\Delta}_1| < |\bar{\Delta}_2|,$$

$$\bar{\Delta}_2 = 21,3$$

$$\bar{\Delta}^2_1 = 1,456, \text{ т.е. } |\bar{\Delta}^2_1| < |\bar{\Delta}^2_2|,$$

$$\bar{\Delta}^2_2 = 2580$$

поэтому уравнение (5.23) более качественное, чем (5.31).

Однако, при расчетах по уравнению (5.23) результаты получаются в среднем завышенные, так как $\bar{\Delta}_1 = 16,57$ (положительная). Но $\bar{\Delta}_1$ не является объективной оценкой качества уравнения (5.23), так как для другой выборки может оказаться, что $\bar{\Delta}_1$ будет отрицательной. По $\bar{\Delta}_1$ можно лишь оценить порядок ошибки вычисления по (5.23).

По полученному уравнению был построен график, связывающий P и dH , и отображающий функцию $P = f(dH)$. График изображен на рисунке 5.2. Полученное уравнение регрессии (5.23) и график (рисунок 5.2) представляют собой основное содержание косвенного метода определения водозапаса ВОБЛ.

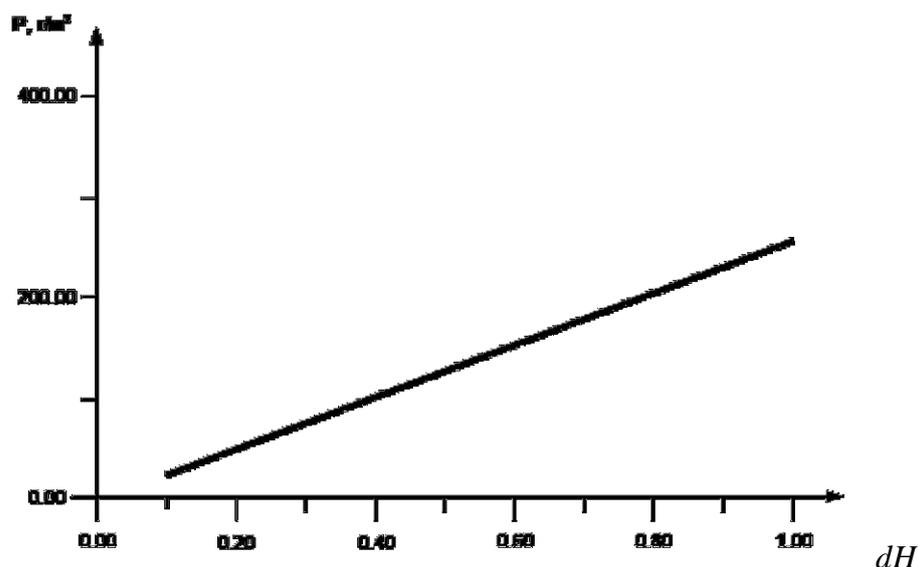


Рисунок 5.2 – Зависимость водозапаса волнистообразных облаков от их мощности

Соответственно сам метод выглядит следующим образом:

1. Определяется мощность облачного слоя в км.
2. По графику (рисунок 5.2) или уравнению (5.23) определяется водозапас облаков.

Разработанный косвенный метод определения водозапаса позволяет определить водозапас для оценивания пригодности ВОБЛ к воздействию. При этом не требуется определять водность облака, что важно при обеспечении ряда прикладных задач (например, десантировании аварийных групп), когда требуется оперативность в принятии решений.

При применении разработанного косвенного метода определения водозапаса ВОБЛ целесообразно выполнять следующие рекомендации:

1. Сбор данных о dH целесообразнее всего проводить с помощью самолета (воздушного разведчика погоды). Зная мощность облаков над пунктами взлета, можно с большой точностью определить мощность St-Sc облаков радиусе до 500 км в случае сплошной облачности над этими районами.

2. Данный метод можно применять только в районе города Москвы, так как исследования проводились на базе данных сетевого СЗА над этим пунктом. Для того, чтобы использовать этот метод в других ФГР, необходимо выполнить корреляционный анализ характеристик облачности с использованием данных зондирования атмосферы над соответствующими пунктами и получить уравнения регрессии для этих пунктов.

Целесообразно проведение исследований в следующих направлениях:

1. Составление уравнений регрессии для других периодов года (по месяцам, по сезонам, для теплого полугодия), что должно, по-видимому, повысить качество уравнения регрессии.

2. Совершенствование метода путем составления уравнения регрессии, связывающего другие характеристики облачности и подоблачной атмосферы (кроме dH и T_3).

3. Разработка аналогичных методов, применяемых в других районах, на основе обработки и анализа соответствующих данных самолетного СЗА над этими пунктами.

4. Целесообразно возобновить практику получения данных о состоянии атмосферы и расширить сеть пунктов СЗА.

Разработанный метод определения водозапаса ВОБЛ может быть использован в практике работ по их воздействию с целью решения широкого круга прикладных задач (военных, хозяйственных, экологических).

5.5. Рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденную облачность на основе полученных данных о их характеристиках

Развитие работ по воздействию на атмосферные процессы и явления обуславливает необходимость разработки практических рекомендаций по применению методов и средств воздействия на природные объекты. Исходя из этого ниже приведены такие рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденную облачность, которые могут быть сведены к следующим:

1. Для воздействия на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака в качестве средств доставки в облака химических реагентов и их рецептур целесообразно использование, прежде всего, авиационных средств – самолетов типа Ан-12, Ан-30, Ан-24, Ан-26, Як-42, Ил-76 и др., оснащенных специальными генераторами для диспергирования аэрозолей кристаллизующих реагентов (например, частиц йодистого серебра), установок для применения твердой углекислоты и жидкого азота, а также устройств для сброса в вершине конвективных облаков (с целью их разрешения) грубодисперсных порошков (например, упаковок с цементом).

Применение авиационных средств (в частности, самолетов) объединяется тем обстоятельством, что они имеют ряд достоинств по сравнению с использованием наземных генераторов. К их числу можно отнести такие, как:

- возможность применения для воздействия на облака различных форм;
- способность осуществления прицельного внесения химических реагентов в заданную часть облака;
- возможность проведения воздействия на значительных площадях (сотни тысяч и десятки тысяч км²), в течение длительного времени (до 7-8 часов) и на разных высотах (от нескольких сотен метров до 8-10 км);
- возможность воздействия не только на облака естественного происхождения, но и на другие природные процессы (например, на ледники и снега, на безоблачную атмосферу с целью создания искусственных облаков и др.).

2. С целью повышения оперативности проведения воздействия на облака на самолетах по п. 1, осуществляющих воздействие, целесообразно, наряду со средствами воздействия, размещать также и комплекс аппаратуры для измерения характеристик облаков (температуру и влажность воздуха на границах облачных слоев и внутри облаков, водность, степень обледенения, размеры и концентрация капель и др.).

3. Использование наземных генераторов аэрозолей льдообразующих реагентов для воздействия на переохлажденные слоистообразные и конвективные облака вряд ли целесообразно, поскольку их применение вряд ли способно обеспечить в облаках необходимую для достижения желаемого результата (например, рассеяние облачного

покрова или вызывание искусственных осадков) концентрацию частиц реагента для образования твердой фазы.

Применение наземных генераторов льдообразующих аэрозолей (в частности, генераторов йодистого серебра) за рубежом (Франция, США, Испания и др.) осуществляется, главным образом, в горных районах с целью воздействия на орографические облака.

4. В качестве химических реагентов для воздействия на переохлажденные облака целесообразно на современном этапе использовать в нашей стране твердую углекислоту и жидкий азот, применяемую разными способами, или йодистое серебро, применяемое, как правило, в пиропатронах-генераторах с помощью специальных устройств. Это связано с тем, что в нашей стране эти реагенты успешно применяются с помощью имеющихся средств на протяжении последних лет.

5. Применение в качестве химического реагента жидкого азота целесообразно осуществлять, главным образом, при воздействии на маломощные (до 300 м) волнистообразные облака. Это связано с тем, что при использовании этого реагента образование частиц твердой фазы происходит лишь на верхней границе облака, вдоль линии засева.

6. Воздействие с помощью твердой углекислоты на волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака должно осуществляться с учетом их вертикальной протяженности. Это связано с длиной пути, который проходит частица твердой углекислоты определенного размера. Так при воздействии на однослойные волнистообразные облака толщиной 300-500 м оптимальный размер частиц CO_2 должен лежать в пределах 0,2-0,3 см, при воздействии на слоистообразные облака толщиной до 1-3 км размер частиц CO_2 целесообразно брать в пределах 0,6-0,8 см, а при засеве конвективных облаков толщиной более 4 км размеры частиц CO_2 уже должны быть в пределах 1,0-2,5 см.

7. Выбор химического реагента при воздействии на переохлажденные облака должен осуществляться с учетом количества засеваемых слоев и цели воздействия. Так, например, при воздействии на двухслойные волнистообразные облака с целью одновременного их рассеяния целесообразно использование твердой углекислоты. При этом размер частиц реагента (CO_2) должен выбирать с учетом вертикальной протяженности каждого слоя волнистообразных облаков, а также протяженности безоблачной прослойки. В этом случае частицы твердой углекислоты при своем падении будут «прошивать» сразу оба слоя облаков, что, в свою очередь, позволит обеспечить одновременное рассеяние двух засеянных слоев облачности. Тем самым может быть полученный гарантированный положительный результат. В этом случае, однако, неизбежно расход реагента (CO_2) возрастает.

8. При использовании в качестве химического реагента жидкого азота или йодистого серебра в неотстреливаемых пиропатронах-генераторах в случае воздействия на многослойные переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака с целью их рассеяния для получения одновременного положительного эффекта необходим засев каждого облачного слоя.

9. Воздействие на переохлажденные конвективные облака с целью вызывания искусственных осадков может осуществляться как с помощью твердой углекислоты, так и жидкого азота и йодистого серебра (в пиропатронах-генераторах), путем их применения на верхней границе облаков.

10. Воздействие на переохлажденные и теплые конвективные облака с целью их разрушения возможно и целесообразно с помощью цемента, используемого в строительстве (например, цемент марки 400). Применение цемента осуществляется в виде картонных упаковок, содержащих по 25-30 кг реагента, с помощью специального устройства. При применении цемента его частицы, являясь гигроскопическими ядрами конденсации, приводят к образованию большого количества облачных капель. Эти капли, вырастая до размера падающих частиц осадков, создают мощный нисходящий поток в облаке, который, подавляя восходящий поток, приводит к разрушению конвективного облака в течение 15-20 мин. Основным ограничением применения в качестве химического реагента цемента является вертикальная протяженность конвективных облаков. В настоящее время с помощью применения цемента удавалось успешно разрушать конвективные облака толщиной порядка 4-5 км.

11. С целью обоснования необходимости и целесообразности проведения работ по воздействию на различные виды переохлажденной облачности (слоистообразные, волнистообразные и конвективные облака) с определенной целью в конкретных ФГР страны необходимо получить по материалам самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7м количественные оценки пригодности облаков к воздействию.

12. С целью оценивания общего положительного эффекта при воздействии на переохлажденные волнистообразные облака как в центральном районе ЕТР, так и в других ФГР страны необходимо получение количественных оценок повторяемости теплых и переохлажденных ВОБЛ по месяцам, сезонам и полугодиям.

13. При воздействии на переохлажденные волнистообразные облака (как однослойных, так и многослойных) с целью их рассеяния и вызывания (интенсифицирования) осадков возможно использование одного самолета. Однако в этом случае в качестве химического реагента необходимо использовать твердую углекислоту. При этом размер частиц CO_2 должен осуществляться с учетом вертикальной протяженности облаков и безоблачных прослоек.

В половине же случаев воздействие на ВОБЛ целесообразно осуществлять с помощью одного самолета, поскольку повторяемость однослойных волнистообразных облаков над центральным районом ЕТР составляет в холодное полугодие 66-76%. В этом случае в качестве химического реагента могут быть использованы не только твердая углекислота, но и жидкий азот и йодистое серебро (в пиропатронах-генераторах).

14. В целях выбора для воздействия на переохлажденные волнистообразные и слоистообразные облака химических реагентов и экономии их расхода целесообразно иметь данные о таких характеристиках облаков, как: вертикальная протяженность облачных слоев, водность, температура облаков. Это обстоятельство, в свою очередь, обуславливает необходимость проведения до начала мероприятий по воздействию на облака самолетное зондирование атмосферы.

15. С целью повышения оперативности воздействия на переохлажденные ВОБЛ, а также снижения финальных расходов на проведение такого рода работ целесообразна разработка методов оценивания пригодности их к воздействию по наземным данным. Проведение такого рода исследований целесообразно не только в отношении центрального района ЕТР, но и других ФГР страны.

16. В случае значительной повторяемости переохлажденных туманов и низких ВОБЛ в конкретном ФГР целесообразно использование на аэродромах стационарных и

мобильных углекислотных и пропановых установок, а также установок на основе жидкого азота.

17. При необходимости осуществления рассеяния переохлажденных ВОБЛ и СОБЛ значительной вертикальной протяженности (до 1500 м) необходимо увеличить расход твердой углекислоты до 10 кг/км при ширине между линиями засева 1-1,5 км.

18. Для получения положительного эффекта при воздействии на слабопереохлажденные волнистообразные облака (в диапазоне температур от минус 1 до минус 3°С) целесообразно использование авиационных средств, оборудованных пропановыми генераторами (а таковые имеются за рубежом, в частности в США), или углекислотными установками, позволяющими получать расход частиц CO₂ порядка нескольких килограммов на километр пути самолета.

19. В случае отсутствия на самолете, осуществляющим засев облаков, прибора водности для получения значений водозапаса волнистообразных облаков необходима разработка косвенных методов их расчета по другим характеристикам облаков, в частности, по значению вертикальной протяженности облачного слоя.

20. Для решения определенного перечня прикладных задач в интересах различных министерств и ведомств рассмотреть возможность и целесообразность создания специальных метеоэскадрилий вблизи крупных мегаполисов (например, Москва и Санкт-Петербург) для проведения работ по воздействию на переохлажденные и теплые облака различных форм, а также на атмосферные процессы с целью создания искусственных облаков и туманов.

21. При воздействии на переохлажденные и теплые волнистообразные облака с целью их рассеяния для контроля результатов таких работ необходимо привлечение дистанционных средств, и в первую очередь, ИСЗ.

22. При воздействии на переохлажденные ВОБЛ как с целью их рассеяния, так и с целью вызывания (интенсифицирования) осадков необходима разработка методов измерения (например, с помощью ИСЗ) температуры воздуха на верхней границе облаков с точностью не ниже 1°С, а также составление уравнений регрессии, связывающие значения температуры воздуха на границах облачности ($t_{НГО} - t_{ВГО}$).

Приведенные выше рекомендации по воздействию на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака могут быть использованы при планировании, подготовке и проведению таких работ не только в пределах центрального района ЕТР, но также и в других ФГР страны. Кроме того, они могут позволить решить широкий круг хозяйственных и экологических задач в интересах обеспечения деятельности министерств и ведомств.

5.6. Основные направления дальнейших работ в области создания методов и средств воздействия на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака

На основе выполненных в диссертации исследований и полученных результатов представляется возможным сформулировать основные направления дальнейших работ в области воздействия на переохлажденную облачность. Эти направления могут включать в себя:

в общем плане:

- создание концептуально-методологических основ разработки и применения методов и средств воздействия на переохлажденные облака и туманов и средств контроля за результатами воздействия на них;
- разработку эндо-тезауруса (отраслевого словаря) по проблеме воздействия на переохлажденные облака и туманы;
- обоснование перечня прикладных задач (хозяйственных и экологических), решаемых в интересах различных министерств и ведомств (например, департаментов воздушного, железнодорожного, наземного, морского и водного транспорта, МЧС, сельского хозяйства и др.);
- оценивание возможности использования штатных средств различных министерств и ведомств для воздействия на облака и туманы (например, возможность использования самолетов лесоохраны (Ан-30, Ан-26) и МЧС (Бе-200), в частности средствами для диспергирования химических реагентов с целью тушения лесных пожаров);
- создание атласа переохлажденных облаков различных форм в конкретных физико-географических районах страны для воздействия с целью рассеяния и вызывания (интенсифицирования) осадков;
- сравнительную оценку отечественных и зарубежных средств воздействия на переохлажденные облака с целью объективного прогноза их развития;
- участие российских специалистов в международных проектах по воздействию на переохлажденные облака и туманы, осуществляемых в странах ближнего и дальнего зарубежья;
- оценивание возможности применения достижений в различных областях науки и техники применительно к проблеме воздействия на переохлажденные облака и туманы;
- разработку концептуально-методологических основ специального гидрометеорологического (метеорологического) обеспечения мероприятий по воздействию на переохлажденные облака и туманы;
- оценивание возможности применения современных дистанционных средств зондирования (в частности, космических средств) для определения переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков к воздействию с определенной целью;
- разработку новых методик по воздействию на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака с учетом конкретно решаемой прикладной задачи;
- разработку методик по оцениванию качества мероприятий по воздействию на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака с определенной целью в интересах решения конкретной прикладной задачи;
- экологическую экспертизу предлагаемых проектов и программ в конкретном ФГР страны по воздействию на переохлажденные облака в интересах метеозащиты крупных городов;

в области разработки химических реагентов и их рецептур:

- разработку новых льдообразующих реагентов, обладающих высоким температурным порогом льдообразования (около минус 1°С) и значительным выходом активных частиц с 1 г (не менее 10^{12} - 10^{13} при температуре минус 10°С);

- разработку высококачественных кристаллообразующих реагентов органического и биогенного происхождения для воздействия на переохлажденные облака и туманы;
 - разработку пиротехнических средств воздействия на переохлажденные облака и туманы с пониженным содержанием йодистого серебра;
 - разработку химических средств воздействия на переохлажденные облака и туманы в интервале значений температур воздуха от минус 1 до минус 3°C;
 - повышение льдообразующего действия хладореагентов (в частности, за счет совместного применения ее с йодистым серебром или применения пористых гранул веществ, пропитанных жидким азотом);
 - разработку методов и средств, обеспечивающих сохранность льдообразующей активности химических реагентов (в частности, твердой углекислоты);
 - повышение льдообразующей активности действия йодистого серебра при использовании его в смесях с йодосодержащими гигроскопическими соединениями (например, йодистым аммонием);
 - установление оптимального размера активных частиц йодистого серебра с целью получения максимального выхода льдообразующих ядер;
 - разработку пиротехнических средств с ультрамалым содержанием йодистого серебра (до 2%);
 - разработку способов повышения льдообразующей активности действия кристаллизующих реагентов;
 - разработку заряженных гигроскопических реагентов для воздействия на переохлажденные конвективные облака с целью вызывания искусственных осадков в интересах тушения лесных пожаров;
 - разработку реагентов, позволяющих осуществлять воздействие как на теплые, так и переохлажденные облака и туманы;
- в области создания технических средств:
- создание парка самолетов-лабораторий, предназначенных для исследования характеристик облаков различных форм и осуществления воздействия на них;
 - разработку и внедрение в оперативную практику авиационных пропановых установок для воздействия на слабпереохлажденные волнистообразные облака (при средней температуре облачного слоя от минус 1°C до минус 3°C);
 - разработку авиационного комплекса средств воздействия для внесения определенных порций реагента в заданную часть облака в автоматическом режиме с самолетов различных типов;
 - разработку технических средств для воздействия на теплые и переохлажденные облака с помощью как кристаллизующих, так и гигроскопических реагентов;
 - создание новых технических средств воздействия на облака и туманы, реализующих новые методы воздействия;
 - разработку технических средств (генераторов), обеспечивающих возгонку органических льдообразующих реагентов и их диспергирование в облака;
 - разработку автоматизированного комплекса технических средств в составе системы измерения характеристик облаков и атмосферы, бортового вычислительного комплекса и средств для диспергирования химических реагентов и их рецептур;

- разработку способов и технических средств для возгонки органических химических реагентов (ацетилацетоната меди, флороглуцина и др.) и их диспергирования в облака;
- разработку генераторов, способных обеспечить повышение льдообразующей активности хладореагентов (твердой углекислоты, жидкого азота);
- разработку генераторов, расположенных на борту авиационных средств и позволяющих применение химических реагентов различных типов;
- разработку технических средств борьбы с кристаллическими туманами;
- оценивание возможности использования существующих технических средств доставки и диспергирования химических реагентов для воздействия на переохлажденные облака и туманы для создания искусственных атмосферных образований;
- оценивание возможности использования тепловых систем для рассеяния переохлажденных туманов.

Существенное влияние облаков и туманов на хозяйственную деятельность человека обуславливает необходимость в разработке и практическом применении методов и средств, позволяющих устранить или в значительной мере снизить это негативное влияние. В качестве таковых целесообразно применение методов и средств воздействия на природные процессы и явления.

Техническая реализуемость, экономическая доступность и выгода, возможность решения широкого круга прикладных задач и др. делают методы и средства воздействия на облака и туманы перспективными для решения многих проблем на благо человека.

Выводы по 5 главе

1. Разработана методика подготовки и проведения мероприятий по воздействию на переохлажденные волнистообразные облака с целью рассеяния в интересах проведения поисково-спасательных работ, включающая три этапа: организационный, подготовительный и исполнительный. Каждый из них содержит ряд подэтапов, подробно рассмотренных в диссертации.

2. Проведено оценивание качества мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков по таким показателям, как: результативность, оперативность, ресурсоемкость и экологичность. Установлено, что по указанным показателям проведение мероприятий по рассеянию волнистообразных облаков в интересах проведения поисково-спасательных работ в условиях наличия низкой облачности, исключающей применение самолетов, вертолетов и беспилотных летательных аппаратов целесообразно и может быть использовано на практике. Сделан вывод о том, что оперативность проведения поисково-спасательных работ с учетом рассеяния низкой облачности может быть повышена в среднем от 1,5 – 2 до 7 – 10 раз (в зависимости от продолжительности нахождения облаков над районом поиска – от 10 – 14 до 48 -72 часов).

3. Разработан метод определения водозапаса волнистообразных облаков без непосредственного измерения влажности облаков, по 18 метеорологическим величинам. Установлено, что наиболее тесно водозапас волнистообразных облаков связан с их мощностью (коэффициент корреляции – 0,84). Построены график и уравнение регрессии такой зависимости.

4. Разработаны научно-обоснованные практические рекомендации по применению методов и средств воздействия на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака.

5. Обоснованы перспективы и направления дальнейших исследований в области воздействия на переохлажденную облачность. Показано, что дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении разработки средств контроля за результатами воздействия на облака и оценивания общего эффекта воздействия.

Заключение

1. Сформирована база данных для исследования характеристик переохлажденной облачности (переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков) применительно к проблеме воздействия на нее на основе обработки материалов самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7м над аэропортом Внуково за 1954-1964 гг. Всего обработано около 6000 (5873) подъемов самолетов-зондировщиков.

Исследованы закономерности распределения характеристик (расслоенность, фазовая структура, водность и водозапас и др.) волнистообразных и слоистообразных облаков на основе их статической обработки. Учитывая специфику решаемой задачи, характеристики облаков рассчитывались для каждого месяца холодного периода с ноября по март, за весь период и за зимний сезон (декабрь-февраль) как для осадконесущих облаков, так и для облаков без осадков.

Установлено, что волнистообразные облака в холодное полугодие (ноябрь-март) чаще являются однослойными (повторяемость составляет 66-76% в зависимости от месяца), жидкокапельными (при этом как для слоистых, так и для слоисто-кучевых облаков повторяемость капельной фазы почти одинакова и составляет не менее 88% для St и 91% для Sc облаков) и переохлажденными (величины повторяемости для облаков с осадками и без осадков практически одинаковы и составляют 90-92%).

Слоистообразным облакам, напротив, присуща значительная расслоенность. Общим для всех месяцев является преобладание двухслойных облаков. Повторяемость таких облаков зимой составляет 36,5%, в холодное полугодие – 35,3%. Существенна повторяемость одно- и трехслойной облачности. Так, повторяемость однослойных облаков изменяется в пределах 17,6-26,1%, а трехслойных – от 19,6 до 32,7%. Четырехслойные облака встречаются не чаще, чем в 13% случаев. Еще реже наблюдается пяти- и шестислойная облачность, на долю которой приходится 6 и 2% соответственно. Слоистообразные облака также имеют и сложную фазовую структуру. Соискателем выявлено девять типов фазового строения слоистообразных облаков (как с осадками, так и без осадков).

2. Получены количественные оценки пригодности волнистообразных и слоистообразных облаков с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния (стабилизации) облачных слоев. Установлено, что переохлажденные волнистообразные облака пригодны к рассеянию зимой в 81,8% случаев, в холодное полугодие – в 76,9% случаев, слоистообразные облака - 10,8% и 10,0% соответственно. Повторяемость волнистообразных облаков, пригодных к вызыванию осадков составляет зимой и в холодное полугодие 40,9% и 37,2%, к интенсифицированию осадков - 45,8% и 43,8% соответственно. Повторяемость слоистообразных облаков, пригодных к вызыванию осадков составляет зимой и в холодное полугодие 26,9% и 23,9%, к интенсифицированию осадков - 59,6% и 59,0% соответственно.

Конвективные облака пригодны для воздействия с целью вызывания искусственных осадков в среднем за теплое полугодие в 48% случаев. Максимум повторяемости (55%) наблюдается в мае, минимум (32%) – в сентябре. Оценки повторяемости пригодных к рассеянию конвективных облаков показывают, что чаще всего условия для воздействия на облака отмечаются в апреле (68%). В июле таких облаков наблюдается меньше всего – 40%. В целом в теплое полугодие повторяемость пригодных к рассеянию конвективных облаков составляет чуть более 50%.

3. Разработаны методики воздействия на волнистообразные и слоистообразные облака с целью вызывания (интенсифицирования) осадков и рассеяния (стабилизации) облачных слоев.

Разработана методика расчета стоимости мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков.

4. Разработана методика подготовки и проведения мероприятий по воздействию на переохлажденные волнистообразные облака с целью рассеяния в интересах проведения поисково-спасательных работ, включающая три этапа: организационный, подготовительный и исполнительный. Каждый из них содержит ряд подэтапов, подробно рассмотренных в диссертации.

5. Проведено оценивание качества мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков по таким показателям, как: результативность, оперативность, ресурсоемкость и экологичность. Установлено, что по указанным показателям проведение мероприятий по рассеянию волнистообразных облаков в интересах проведения поисково-спасательных работ в условиях наличия низкой облачности, исключающей применение самолетов, вертолетов и беспилотных летательных аппаратов целесообразно и может быть использовано на практике. Сделан вывод о том, что оперативность проведения поисково-спасательных работ с учетом рассеяния низкой облачности может быть повышена в среднем от 1,5 – 2 до 7 – 10 раз (в зависимости от продолжительности нахождения облаков над районом поиска – от 10 – 14 до 48 -72 часов).

6. Разработан метод определения водозапаса волнистообразных облаков без непосредственного измерения влажности облаков, по 21 паре метеорологических величин. Установлено, что наиболее тесно водозапас волнистообразных облаков связан с их мощностью (коэффициент корреляции – 0,84). Построены график и уравнение регрессии такой зависимости.

7. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по применению методов и средств модифицирования переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков.

8. Обоснованы перспективы и направления дальнейших исследований в области модифицирования переохлажденной облачности. Показано, что дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении разработки средств контроля за результатами воздействия на облака и оценивания общего эффекта воздействия.

Список сокращений и условных обозначений

АВ	- активное воздействие
ВНГО	- высота нижней границы
ВОБЛ	- волнистообразные облака
ГМИ	- гидрометеорологическая информация
ГМО	- гидрометеорологическое обеспечение
ИРО	- искусственное регулирование осадков
ИСЗ	- искусственный спутник Земли
ЛА	- летательный аппарат
ММРЛ	- малогабаритный метеорологический радиолокатор
МПУ	- мобильный пункт управления
МПУ АВ	- мобильный пункт управления по активному воздействию
ОЦ	- оперативный центр
ОЯП	- опасные явления погоды
ПАК	- программно-аппаратный комплекс
ПВОБЛ	- переохлажденные волнистообразные облака
ПОТ	- переохлажденные облака и туманы
ПСОБЛ	- переохлажденные слоистообразные облака
ПСОТ	- переохлажденные слоистообразные облака и туманы
РД	- руководящие документы
СЗА	- самолетное зондирование атмосферы
СОБЛ	- слоистообразные облака
ТС	- техническая система
ТТХ	- тактико-технические характеристики
УФ	- условий функционирования
ФГР	- физико-географический район
ХР	- химические реагенты
ЦВ	- целевое воздействие
ЦНП	- целенаправленный процесс
ЦР ЕТР	- Центральный район Европейской территории России
ЧС	- чрезвычайные ситуации

Список использованных источников

1. Фролов, А.В. Современная российская гидрометеорологическая служба: новации и точки роста / А.В. Фролов // Труды VII Всероссийского метеорологического съезда, 7-9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. Пленарный доклад. – СПб.: ООО «Д'АРТ», 2015. – С. 9-31.
2. Абшаев, М.Т. Состояние и перспективы развития работ по активным воздействиям в Российской Федерации и за рубежом / М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев, А.М. Малкарова // Труды VII Всероссийского метеорологического съезда, 7-9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. Пленарный доклад. – СПб.: ООО «Д'АРТ», 2015. – С. 151-174.
3. Никандров, В.Я. Физические основы современных методов активных воздействий на переохлажденные облака и туманы / В.Я. Никандров. – Л.: ЛКВВИА им. А.Ф. Можайского, 1959. – 158 с.
4. Качурин, Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы / Л.Г. Качурин. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 462 с.
5. Колосков, Б.П. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов / Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, Г.Г. Щукин. – СПб.: РГГМУ, 2012. – 341 с.
6. Деннис, А. Изменение погоды засевом облаков / А. Деннис. – М.: «Мир», 1983. – 272 с.
7. Бурцев, И.И. Создание и внедрение технологий активных воздействий в СССР / И.И. Бурцев // Очерки и истории активных воздействий на метеорологические процессы в СССР и на постсоветском пространстве. – СПб.: РГГМУ, 2017. – С. 25-60.
8. Беляев, В.П. Активные воздействия на облака и оценка их результатов: опыт работы над Москвой 9 мая 1995 г. / В.П. Беляев, Г.П. Берюлев, М.П. Власюк, Б.Г. Данилян, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, Ю.В. Мельничук, А.А. Черников // Обзорные прикладной и промышленной математики, серия «Вероятность и статистика». – М.: Научное издательство «ТВП», 1996. – Т. 3. – Вып. 2. – С. 149-162.
9. Беляев, В.П. Опыт активного воздействия на облака над Москвой 9 мая 1995 г. / В.П. Беляев, Г.П. Дерюлев, М.П. Власюк, Б.Г. Данилян, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, Ю.В. Мельничук, А.А. Черников // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 5. – С. 71-82.
10. Щукин, Г.Г. Активные воздействия на облачные системы с целью обеспечения благоприятных погодных условий в период празднования 300-летия Санкт-Петербурга 30-31 мая 2003 года / Г.Г. Щукин, В.Н. Козлов, В.Д. Степаненко, С.М. Гальперин, В.Н. Стасенко // Труды НИЦ ДЗА. – 2004. – Вып. 5(553). – С. 143-168.
11. Дядюченко, В.Н. Опыт работы по метеозащите крупных городов / В.Н. Дядюченко, В.П. Корнеев, В.Н. Стасенко // Материалы юбилейной конференции «Состояние и перспективы развития технологии и технических средств воздействия на гидрометеорологические процессы». – Чебоксары, 1999. – С. 48-49.
12. Колосков, Б.П. Оценка результатов работ по метеозащите крупных городов / Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, В.В. Петров, Г.П. Берюлев, Б.Г. Данилян, Г.Г. Щукин // Метеорология и гидрология. – 2011. – №2. – С. 66-73.
13. Колосков, Б.П. Современная концепция метеозащиты мегаполисов методами активных воздействий / Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, В.В. Петров, Г.П. Берюлев, Б.Г. Данилян // Метеорология и гидрология. – 2010. – №8. – С. 21-32.
14. Колосков, Б.П. Метеозащита мегаполисов: концепция, технические средства и результаты / Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, В.В. Петров, Г.П. Берюлев, Б.Г. Данилян //

Вопросы физики облаков (Сборник статей памяти С.М. Шметера). – М., 2008. – С. 174-200.

15. Довгалоук, Ю.А.. Анализ результатов работ по воздействию на облака с целью предотвращения осадков в г. Ленинграде (на примере опыта 7 ноября 1988 г.) / Ю.А.Довгалоук, Е.В.Оренбургская, А.М.Пирнач и др. // Метеорология и гидрология : сборник статей. – 1988. – № 2. – С. 44-53.

16. Атабиев, М.Д. О проведении работ по метеозащите Ташкента 21 марта 2002 г. / М.Д. Атабиев, А.А. Имамджанов, Б.А. Камалов, В.Н. Козлов, И.У. Усманов, Г.Г. Щукин // Труды НИЦ-ДЗА. – 2002. – Вып. 4(552). – С. 139-151.

17. Колосков, Б.П. Результаты опытно-производственных работ по искусственному рассеиванию переохлажденных туманов в аэропорту Алматы в 2002-2003 гг. / Б.П. Колосков, Л.И. Красновская, Б.Н. Сергеев, А.А. Черников, Т.А. Идрисов, А.А. Гордеев, С.И. Абишев, К.А. Кан // Метеорология и гидрология. – 2005. – №10. – С. 33-42.

18. Колосков, Б.П. Статистическая оценка результатов оперативных работ по увеличению осадков в Сирии: 1991-2000 / Б.П. Колосков, Ю.В. Мельничук, Али Аббас // Тезисы докладов Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – Нальчик, 2001. – С. 103-105.

19. Берюлев, Г.П. Результаты работ по увеличению осадков в Центральной части Ирана: 1999-2001 гг. / Г.П. Берюлев, Б.П. Колосков, Б.Г. Данелян, А.А. Черников, А. Семсар Язди, Н. Пахванханоссейн, Ф. Амиряздани Хатаби // Тезисы докладов Научной конференции по результатам исследований в области гидрометеорологических и мониторинга природной среды в государствах – участниках СНГ. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – С. 21-22.

20. Беляев, В.П. Исследования процессов осадкообразования в тропических конвективных облаках и оценка их пригодности для воздействия / В.П. Беляев, Б.И. Зимин, Б.П. Колосков, В.В. Петров, Ю.А. Серегин, А.А. Черников // Труды ИАО, 1996. – Вып. 181. – С. 3-17.

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

22. Берюлев, Г.П. Полевые исследования возможности увеличения осадков путем засева облаков на территории Португалии / Г.П. Берюлев, Б.П. Колосков, Б.Г. Данелян, А.А. Черников, В.П. Корнеев, В.Н. Стасенко // Тезисы докладов Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – Нальчик, 2001. – С. 85-87.

23. Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 23-25 октября 2001 года. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. – 315 с.

24. Труды научной конференции по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения окружающей среды в государствах-участниках СНГ, посвященная 10-летию образования Межгосударственного совета по гидрометеорологии. Секция 4. АВ на гидрометеорологические и геофизические процессы и явления. Гидрометеоиздат, СПб. 2002.

25. Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 7-9 октября 2014 г,

Нальчик. Часть 1, Часть 2. – Нальчик, ООО «Печатный двор», 2015. – Ч. 1. – 334 с., Ч. 2. – 404 с.

26. Труды Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 70-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, Нальчик, 28-29 сентября 2005 г. – Издательство ЛКИ. – 2008.

27. Доклады научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий. Нальчик, 10-12 октября 2007 г. / Под редакцией профессора М.Т. Абшаева. – Нальчик, ООО «Печатный двор». – 391 с.

28. Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 24-28 октября 2011 г. / Под редакцией Л.М. Федченко, М.Т. Абшаева, Х.М. Калова. – Нальчик: ООО «Печатный двор», 2013. – 488 с.

29. Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященный 70-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, Нальчик, 28-30 сентября 2008 г. / Под редакцией Х.М.Калова, В.Н. Стасенко. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 416 с.

30. Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 23-27 октября 2017. Часть 1, часть 2. – Нальчик – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. Ч.1 – 354 с. Ч.2 – 340 с.

31. Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» / Под общ. ред. С.С.Суворова. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2012. – Т.1 – 330 с.; Т.2 – 336 с.

32. Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» / Под общ. ред. профессора М.М.Пенькова. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2014. – Т.1 – 368 с.; Т.2 – 436 с.

33. Труды IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» / Под общ. ред. Ю.В.Кулешова. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2016.

34. Материалы V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб, 23-25 мая 2018. – Ч.1,2. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2018. – Ч.1 – 308 с., Ч.2 – 290 с.

35. Труды Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2018. – Вып. 662. – 273 с.

36. Базанин, Н.В. Бортовые комплексы самолета-лаборатории ЯК-42Д «Роскомгидромет» для измерения и регистрации навигационных параметров полета и термодинамических параметров атмосферы / Н.В. Базанин, Ю.А. Борисов, В.В. Волков и др. // Метеорология и гидрология. – 2014. – №11. – С. 109-116.

37. Аджиев, А.Х. Электрические явления в облаках и разработка основ воздействия на них: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, специальность: 11.00.09 – Метеорология, климатология, агрометеорология. – Санкт-Петербург, ГГО, 1992. – 37 с.

38. Мазуров, Г.И. Метеорологические аспекты создания облачных образований в пограничном слое атмосферы. – Диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук. – СПб., РГГМУ. – 1996. – 400 с.

39. Эмба, Я.А. Атмосферные осадки из конвективных облаков и их искусственное регулирование на Северном Кавказе: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Санкт-Петербург, 1997 (ГГО имени А.Ф.Воейкова). – 38 с.

40. Шаповалов, А.В. Математическое моделирование физических процессов в конвективных облаках при естественном развитии и активных воздействиях: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология). – Нальчик, 2002. – 271 с.

41. Калов, Х.М. Физическое обоснование, создание и экспериментальные исследования эффективности нового комплекса технических средств и методов активных воздействий на облака и туманы: Диссертация на соискание доктора физико-математических наук: 25.00.30 – Нальчик, 2002. – 273 с.

42. Колосков, Б.П. Планирование и физико-статистическая оценка эффективности искусственного регулирования осадков методами активных воздействий: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология. – ВГИ, Нальчик, 2010. – 42 с.

43. Малкарова, А.М. Методы и результаты исследований физической и экономической эффективности активных воздействий на градовые процессы: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология). – Нальчик, 2011. – 333 с.

44. Козлов, В.Н. Электрические методы искусственного регулирования осадков: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук (специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология). – Санкт-Петербург, 2014. – 295 с.

45. Абшаев, А.М. Теоретические и экспериментальные исследования активного воздействия на градовые процессы и создание автоматизированной технологии обнаружения и предотвращения града: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология). – Нальчик, 2015. – 317 с.

46. Шаповалов, В.А. Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, специальность: 25.00.30. – Нальчик, 2018. – 44 с.

47. Федоров, О.К. Создание самолетных средств для воздействия на облака с применением порционного сброса реагентов: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ЦАО, 1990. – 189 с.

48. Корнеев, В.П. Разработка и внедрение комплексных самолетных средств воздействия на облака для оперативно-производственных работ: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ЦАО (г. Долгопрудный), 2002. – 139 с.

49. Геккиева, С.О. Экологические аспекты активных воздействий на облака: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 25.00.30 – Нальчик, 2002. – 137 с.

50. Мамучиев, И.М. Численное моделирование активного воздействия на теплые и переохлажденные туманы: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, специальность – 25.00.30. – Нальчик, 2005. – 130 с.

51. Шереметьев, Р.М. Разработка методического подхода и рекомендаций по применению методов и средств модификации слоистообразной облачности для решения народно-хозяйственных и прикладных задач: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология). – Нальчик, ВГИ, 2010. – 22 с.

52. Крюкова, С.В. Квазистатическая модель нуклеации при фазовых переходах воды в атмосфере: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 25.00.30 – СПб., 2011. – 104 с.

53. Клейменова, А.В. Оптимизация процесса искусственного увеличения атмосферных осадков на основе разработки технологии планирования: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность – 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология). – Нальчик, 2015. – 28 с.

54. Петрунин, А.М. Теоретические и экспериментальные исследования процесса распространения льдообразующего аэрозоля в подоблачном слое при воздействии наземными генераторами: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология). – Нальчик, 2016. – 143 с.

55. Бычков, А.А. Теоретические и экспериментальные исследования эффективности применения мобильного комплекса активных воздействий на базе легких летательных аппаратах в работах по искусственному увеличению осадков: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология). – Нальчик, 2017. – 28 с.

56. Частухин, А.В. Экспериментальные и теоретические исследования эффективности применения реагентов для воздействия на облака и туманы: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология). – Нальчик, 2018. – 131 с.

57. Козлова, Н.А. Исследование фазового состояния слоистообразной облачности над центральными районами России применительно к проблеме модифицирования / Н.А. Козлова, О.И. Дидык, А.П. Доронин, В.М. Петроченко, С.А. Шмалько // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2016. – № 651. – С. 91-97.

58. Козлова, Н.А. Эмпирические модели водности и водозапаса волнистообразных и слоистообразных облаков над Центральным районом Европейской территории России / Н.А. Козлова, А.П. Доронин, А.Б. Лебедев, В.М. Петроченко, С.А. Шмалько // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2017. – № 658. – С. 54-61.

59. Козлова, Н.А. Исследование характеристик конвективных облаков над центральным районом европейской территории России применительно к проблеме профилактики возникновения лесных пожаров и борьбы с ними / Н.А. Козлова,

А.П. Доронин, И.В. Гончаров, В.М. Петроченко, А.С. Тимошук // Ученые записки РГГМУ. – 2017. – №50. – С. 28-40.

60. Козлова, Н.А. Методика модифицирования переохлажденных волнистообразных облаков с целью вызывания искусственных осадков / Н.А. Козлова, А.П. Доронин, В.М. Петроченко, Г.Г. Щукин // Ученые записки РГГМУ. – 2018. – № 53. – С. 9-18.

61. Козлова, Н.А. Метод локализации выбросов вредных веществ в местах крупных аварий и пожаров в населенных пунктах с помощью искусственных облаков и туманов / Н.А. Козлова, А.П. Доронин, В.М. Петроченко, Н.Б. Толстоброва // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2018. – № 662. – С. 196-200.

62. Козлова, Н.А. Метод очищения воздушных бассейнов крупных городов от загрязняющих примесей искусственными осадками из облаков / А.П. Доронин, Н.А. Козлова, К.О. Фролов и др. // Естественные и антропогенные аэрозоли: материалы IX междунар. научн. конфер. – СПб., 2014. – С. 27-29.

63. Козлова, Н.А. Основные результаты и перспективы работ в области модифицирования атмосферных процессов и явлений в интересах решения хозяйственных и экологических задач / О.И. Дидык, А.П. Доронин, Н.А. Козлова и др. // Экология и космос: труды II Всероссийской научной конференции имени академика К.Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2015. – С. 214-221.

64. Козлова, Н.А. Научно-методологические основы проблемы модифицирования геофизических процессов и явлений в интересах решения экологических и хозяйственных задач / А.П. Доронин, А.Н. Ефременко, Н.А. Козлова // Экология и космос: труды II Всероссийской научной конференции имени академика К.Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2015. – С. 221-229.

65. Козлова, Н.А. Расслоенность внутримассовых слоистообразных облаков над центральными районами России применительно к проблеме модифицирования в интересах решения экологических и хозяйственных задач / А.П. Доронин, А.Н. Ефременко, С.А. Шмалько // Экология и космос: труды II Всероссийской научной конференции имени академика К.Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2015. – С. 234-241.

66. Козлова, Н.А. Расслоенность слоистообразных облаков над центральными районами России применительно к проблеме модифицирования в интересах решения прикладных задач / Н.А. Козлова, А.Н. Ефременко, А.П. Доронин, С.А. Шмалько // Проблемы повышения эффективности управления авиационными частями и соединениями ВВС: сборник статей по материалам Всероссийской ежегодной научной конференции (9 – 10 апреля 2015 г.): в 5-ти ч. – Воронеж: ВУНЦВВС «ВВА», 2015. – Ч. 4. – С. 267-273.

67. Козлова, Н.А. Метод очищения воздушных бассейнов крупных городов от загрязняющих примесей путем вызывания искусственных осадков из переохлажденных внутримассовых слоистообразных облаков / А.П. Доронин, В.М. Петроченко, Н.А. Козлова, С.А. Шмалько // Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства: межвузовский научно-практический семинар, 16 апреля 2015 г. – СПб.: ВВИ(ИТ) ВА МТО, 2015. – С. 69-74.

68. Козлова, Н.А. Повторяемость переохлажденных внутримассовых слоистообразных облаков над различными районами России применительно к проблеме модифицирования / А.П. Доронин, Н.А. Козлова, К.О. Фролов и др. // Методологические

аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга: труды II Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 36-40.

69. Козлова, Н.А. Фазовое состояние внутримассовой слоистообразной облачности над различными районами России в интересах решения прикладных задач / А.П. Доронин, Н.А. Козлова, К.О. Фролов, С.А. Шмалько // Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга: труды II Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 40-43.

70. Козлова, Н.А. Расслоенность внутримассовых слоистообразных облаков над различными районами России применительно к проблеме модифицирования в интересах решения прикладных задач / А.П. Доронин, Н.А. Козлова, К.О. Фролов, С.А. Шмалько // Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга: труды II Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 43-47.

71. Козлова, Н.А. Оценки пригодности к рассеянию переохлажденных внутримассовых слоистообразных облаков над различными районами России интересах решения прикладных задач / А.П. Доронин, Н.А. Козлова, К.О. Фролов, С.А. Шмалько // Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга: труды II Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 194-198.

72. Козлова, Н.А. Исследование повторяемости конвективных облаков над центральными районами России в интересах решения прикладных задач / А.П. Доронин, И.В. Гончаров, Н.А. Козлова, В.М. Петроченко // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: материалы IV Всероссийской науч. конф. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2016. – С. 52-56.

73. Козлова, Н.А. Методика расчета параметров операции по рассеянию волнистообразных облаков для решения хозяйственных и экологических задач / А.П. Доронин, Н.А. Козлова и др. // Экология и космос: труды III Всероссийской конференции имени академика К.Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2017. – С. 184-188.

74. Козлова, Н.А. Экологические аспекты, связанные с работами по созданию искусственных атмосферных образований в интересах решения хозяйственных и экологических задач / А.П. Доронин, Н.А. Козлова и др. // Экология и космос: труды III Всероссийской конференции имени академика К.Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2017. – С. 221-225.

75. Козлова, Н.А. Перечень экологических проблем, решение которых возможно при модифицировании облаков и туманов естественного и искусственного происхождения / А.П. Доронин, Н.А. Козлова и др. // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2015): материалы IX Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. – СПб.: СПОИСУ, 2015. – С. 245.

76. Козлова, Н.А. Технология модифицирования облачности / А.П. Доронин, Н.А. Козлова и др. // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2017): материалы IX Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. – СПб.: СПОИСУ, 2017.

77. Козлова, Н.А. Модифицированные геофизической среды в интересах решения связанных с чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера экологических проблем / А.П. Доронин, Н.А. Козлова и др. // Региональная информатика и информационная безопасность: сборник трудов. – СПб.: СПОИСУ, 2018. – Вып. 5. – С. 413-416.

78. Козлова, Н.А. (Тихомирова, Н.А.) Регулирование грозовой деятельности в задачах обеспечения народного хозяйства и вооруженных Сил России / А.П. Доронин, Н.А. Тихомирова и др. // Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология: материалы XIV Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Казань, 2002. – Ч.II. – С. 266-268.

79. Козлова, Н.А. (Тихомирова, Н.А.) Очищение воздушного бассейна промышленных районов от загрязняющих примесей путем рассеяния внутримассовой слоистообразной облачности / А.П. Доронин, Н.А. Тихомирова и др. // Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология: материалы XIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Казань, 2001. – Ч.II. – С. 305-306.

80. Козлова, Н.А. (Тихомирова, Н.А.) Повторяемость условий, благоприятных для вызывания осадков из слоистых, слоисто-кучевых облаков над Москвой и Санкт-Петербургом с целью вымывания из атмосферы загрязняющих аэрозолей / А.П. Доронин, Н.А. Тихомирова и др. // Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология: материалы XIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Казань, 2001. – Ч.II. – С. 306-307.

81. Козлова, Н.А. (Тихомирова, Н.А.) Исследование фазовой структуры внутримассовой слоистообразной облачности над Москвой и Санкт-Петербургом для решения задач космического мониторинга / А.П. Доронин, Н.А. Тихомирова и др. // Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология: материалы XIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Казань, 2001. – Ч.II. – С. 307-308.

82. Козлова, Н.А. (Тихомирова, Н.А.) Характеристика расслоенности внутримассовой слоистообразной облачности над Москвой и Санкт-Петербургом для решения задач космического мониторинга / А.П. Доронин, Н.А. Тихомирова и др. // Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология: материалы XIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Казань, 2001. – Ч.II. – С. 308-309.

83. Козлова, Н.А. (Тихомирова, Н.А.) Модифицирование конвективных облаков с целью решения экологических проблем, связанных с лесными пожарами / А.П. Доронин, Н.А. Тихомирова, И.В. Гончаров, Е.А. Чихонадских // Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология: материалы XIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Казань, 2001. – Ч.II. – С. 309-310.

84. Козлова, Н.А. Методика расчета стоимости мероприятий по модифицированию переохлажденных волнистообразных облаков / А.П. Доронин, В.М. Петроченко, Н.А. Козлова, А.С. Тимошук, С.А. Шмалько, П.В. Шабалин // Естественные и антропогенные аэрозоли: Сборник докладов XI научно-прикладной международной конференции. – СПб.: Астерион, 2018. – С. 183-190.

85. Козлова, Н.А. Косвенный метод определения водозаписа волнистообразных облаков / А.П. Доронин, В.М. Петроченко, Н.А. Козлова, А.С. Тимошук, С.А. Шмалько, П.В. Шабалин // Естественные и антропогенные аэрозоли: Сборник докладов XI научно-прикладной международной конференции. – СПб.: Астерион, 2018. – С. 191-198.
86. Козлова, Н.А. К вопросу информационного и операционного обеспечения экологической безопасности / А.П. Доронин, Г.Г. Щукин, В.М. Петроченко, Н.А. Козлова, А.С. Тимошук, С.А. Шмалько // Естественные и антропогенные аэрозоли: Сборник докладов XI научно-прикладной международной конференции. – СПб.: Астерион, 2018. – С. 199-203.
87. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 510 с.
88. Беляев, В.И. О возможности влияния на погоду искусственным рассеянием облачности / В.И. Беляев, Н.С. Павлова // Изв. АН СССР, серия геофизическая. – М., 1962. – №1. – С. 129-132.
89. Зайцев, В.А. Возможности и пути создания полей искусственных облаков / В.А. Зайцев, Б.П. Кудрявцев, А.А. Ледохович // Метеорология и гидрология. – 1977. – №3. – С. 3-9.
90. Борисенко, Е.П. Модель эволюции перистой облачности / Е.П. Борисенко, Т.А. Базлова // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1986. – Том 22. – №1. – С. 36-43.
91. Доронин А.П. Воздействия на атмосферные процессы и явления. Учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2014. – 293 с.
92. Абшаев, М.Т. Проект Северо-Кавказской автоматизированной радиолокационной метеорологической сети / М.Т. Абшаев, А.Ю. Беккиев, В.О. Тапасханов, А.Д. Тебуев // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 23-25 октября 2001 г., Нальчик – Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 2005. – С. 67-85.
93. Снегуров, А.В. К программе построения грозопеленгационной сети Госкомгидромета / А.В. Снегуров, В.С. Снегуров, Г.Г. Щукин // Труды НИИ ДЗА. – 2004. – Вып.5(553). – С. 207-222.
94. Малинин, В.Р. Пожары и экология / В.Р. Малинин, А.В. Фомин, В.С. Звонов // Мониторинг. – 1995. – №2. – С. 38-39.
95. Козлов, В. Искусственное регулирование осадков / В. Козлов, Н. Емельянова, Н. Коршун – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 362 с.
96. Козлов, В.Н. Методы искусственного вызывания осадков для борьбы с лесными пожарами / В.Н. Козлов – СПб.: ИнфоДа, 2011. – 202 с.
97. Белькова, Т.А. К вопросу о оценке уровня загрязнений атмосферы лесными пожарами / Т.А. Белькова, В.А. Перминов, Н.А. Алексеев // Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения», 17-19 ноября 2016 г., Юрга. – «Национальный исследовательский томский политехнический университет», 2016. – С. 215-216.
98. Козлов, В.Н. Тушение лесных пожаров искусственным вызыванием осадков / В.Н. Козлов, С.М. Окунев, А.В. Лихачев, А.П. Щербаков // Труды НИЦ-ДЗА, 2002. – Вып.4(452). – С. 152-163.
99. Данелян, Б.Г. Тушение лесных пожаров с помощью искусственного вызывания осадков. Состояние вопроса и предварительные результаты / Б.Г. Данелян, Н.А. Ковалев,

И.В. Сажин, В.Л. Сементин, О.А. Столпиченко // Сборник докладов Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 23-27 октября 2017 г. В 2 ч. Ч. 1 / Коллектив авторов. – Уфа: АЭСТЕРНА, 2017. – С. 229-237.

100. Матвеев, Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 640 с.

101. Некоторые результаты работы АНО «Агентство атмосферных технологий» (1999-2018 гг.) – www.attech.ru.

102. Данелян, Б.Г. Работы по искусственному регулированию атмосферных осадков / Б.Г. Данелян, В.П. Корнеев // Тезисы докладов VII Всероссийского метеорологического съезда, 7-9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. – СПб., 2014. – С. 69.

103. Очерки истории активных воздействий на метеорологические процессы в СССР и на постсоветском пространстве. – СПб.: РГГМУ, 2017. – 352 с.

104. Корнеев, В.П. Применение российских технологий активных воздействий для снижения ущерба от аномальных погодных явлений и техногенных катастроф / В.П. Корнеев, Б.П. Колосков, Г.Г. Щукин, М.Т. Абшаев, Б.Г. Данелян // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 7-9 октября 2014 г. Часть 1. Нальчик. – Нальчик, ООО «Печатный двор», 2015. – С. 24-29.

105. Бут, И.В. К проблеме активных воздействий на фронтальные облачные системы в горных районах / И.В. Бут // Метеорология и гидрология. – 1962. – №4. – С. 46-47.

106. Цыбин, А.В. Улучшение погодных условий методами активных воздействий и предупреждение опасных гидрометеорологических условий в Москве / А.В. Цыбин // Тезисы докладов VII Всероссийского метеорологического съезда, 7-9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. – СПб., 2014. – С. 73-74.

107. Абшаев, М.Т. Этапы развития противорадовых работ / М.Т. Абшаев, А.М. Малкарова, С.В. Тасенко, И.А. Шумаков // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 23-27 октября 2017 г. Часть 1. Нальчик. – Уфа: АЭСТЕРНА, 2017. – С. 7-27.

108. Монокрович, Э.И. Потенциальная экономическая эффективность искусственного рассеяния переохлажденных туманов в аэропорту Алма-Аты / Э.И. Монокрович, М.П. Власюк, Т.С. Крихели // Труды КазНИГМИ. – 1990. – Вып. 105. – С. 62-67.

109. Клейменова, А.В. Оценка эффективности работ по ИУО для пополнения водохранилищ в зимний период (на примере Чернореченского водохранилища, Крым) / А.В. Клейменова, В.П. Корнеев, Б.П. Колосков, А.М. Петрунин, А.А. Бычков, А.В. Частухин // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 7-9 октября 2014 г. Часть 2. Нальчик. – Нальчик, ООО «Печатный двор», 2015. – С. 322-329.

110. Клейменова, А.В. Оценка эффективности работ по ИУО с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур в Кабардино-Балкарии / А.В. Клейменова, Б.П. Колосков, А.А. Аджиева // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 7-9 октября 2014 г. Часть 2. Нальчик. – Нальчик, ООО «Печатный двор», 2015. – С. 315-321.

111. Клейменова, А.В. Оценка эффективности производственных работ по ИУО самолетным методом на территории Ставропольского края / А.В. Клейменова, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, В.И. Лозовой, И.И. Акимова // изв. вузов Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2014. – №1. – С. 69-73.
112. Методологические указания. Применение метода рассеяния переохлажденных туманов на автодорогах. РД 52.11.640. – 2002. – 26 с.
113. Методологические указания. Проведение работ по искусственному рассеянию переохлажденных туманов в аэропортах наземными средствами с использованием жидкого азота. РД 52.11.638. – 2002. – 24 с.
114. Методологические указания. Проведение работ по искусственному подавлению развития конвективных облаков самолетными средствами. РД 52.11.678. – 2006. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – 22 с.
115. Методологические указания. Проведение работ по искусственному регулированию погодных условий в мегаполисах. РД 52.11.677. – 2006. – СПб.: Гидрометиздат, 2006. – 32 с.
116. Методологические указания. Проведение работ по искусственному увеличению осадков из слоистообразных облаков. РД 52.11.646. – 2003. – СПб.: Гидрометиздат, 2003. – 39 с.
117. Методологические указания. Проведение работ по искусственному увеличению атмосферных осадков самолетными методами. РД 52.11.636. – 2002. – СПб.: Гидрометиздат, 2002. – 31 с.
118. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов. Инструкция РД 52.04.628. – 2001. – Утв. Пр. Коскомгидромет № 202 от 28.04.2001. – СПб.: Гидрометеиздат, 2001. – 24 с.
119. Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов и пожаров. РД 52.04.674. – 2006. – СПб.: Гидрометеиздат, 2006. – 118 с.
120. Макаров, О. Крылатый институт погоды / О. Макаров // Популярная механика. – 2014. – №2(136). – С. 46-50.
121. Азаров, А.С. Новые возможности в проведении исследований атмосферных процессов и мониторинга окружающей среды с использованием самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» / А.С. Азаров, Ю.А. Борисов, Б.Г. Данелян, В.В. Петров и др. // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 7-9 октября 2014 г. Часть 2. Нальчик. – Нальчик, ООО «Печатный двор», 2015. – С. 48-58.
122. Борисов, Ю.А. Первое применение самолета-лаборатории нового поколения Як-24Д для исследования атмосферы и возможности его использования в активных воздействиях / Ю.А. Борисов, Б.Г. Данелян, В.В. Петров, М.А. Струнин и др. // Тезисы докладов VII Всероссийского метеорологического съезда, 7-9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. – СПб., 2014. – С. 72.
123. Дядюченко, В.Н. ДМРЛ-С: состояние, перспективы, использование информации / В.Н. Дядюченко, И.С. Вылегжанин, Ю.Б. Павлюков // Тезисы докладов VII Всероссийского метеорологического съезда, 7-9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. – СПб., 2014. – С. 12-14.
124. Абшаев, М.Т. Оценка эффективности предотвращения града / М.Т. Абшаев, А.М. Малкарова. – СПб.: Гидрометеиздат, 2006. – 279 с.

125. Мамучев, И.М. Туманы и активное воздействие на них / И.М. Мамучев, Х.М. Калов. – Нальчик: ООО «Полиграфсервис и Т», 2011. – 122 с.
126. Ашабоков, Б.А. Физика градовых облаков и активных воздействий на них: состояние и направления развития / Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, В.О. Тапасханов, А.В. Шаповалов и др. – Нальчик: ООО «Печальный двор», 2013. – 216 с.
127. Бекряев, В.И. Некоторые вопросы физики облаков и активных воздействий на них / В.И. Бекряев. – СПб.: РГГМУ, 2007. – 337 с.
128. Крюкова, С.В. Физические основы воздействия на атмосферные процессы: учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2018. – 57 с.
129. Schaefer V. The formation of ice crystals in the laboratory and in the atmosphere // *Chemical Review*, 1949. – vol.44. – №291.
130. Vonnegut B. The nucleation of ice formation by silver iodide // *Journal of Applied Physics*, 1947. – vol.18. – №7. – P. 593-595.
131. Кирюхин, Б.В. К оценке роли твердой фазы воды в образовании атмосферных осадков / Б.В. Кирюхин // *Ученые записки ЛГУ, серия физических наук*. – 1956. – Вып.9. – №210. – С. 9-14.
132. Byers Harace R. History of weather modification // *Weather and climate modification*. – New-York, 1974. – P. 3-44.
133. Зак, Е.Г. Микроструктура фронтальных облаков / Е.Г. Зак // *Метеорология и гидрология*. – 1949. – №6. – С. 24-33.
134. Morris Nuberg, Helmut Weickman. The meteorological background for weather modification // *Weather and climate modification*. – New-York, 1974. – P. 93-135.
135. Половина, И.П. Оценка возможного количества искусственных осадков из внутримассовых слоистообразных облаков / И.П. Половина // *Тр. Укр. НИГМИ*. – 1970. – Вып.89. – С. 57-66.
136. Баханова, Р.А. О механизме образования ледяных кристаллов на кристаллизующих реагентах. Обзор. / Р.А. Баханова. – Обнинск, 1978. – 30 с.
137. Гайворонский, И.И. Искусственные льдообразующие аэрозоли / И.И. Гайворонский, Н.О. Плауде, А.Д. Соловьев // *Метеорология и гидрология*. – 1967. – №10. – С. 38-43.
138. Петрунин, А.М. Методические аспекты применения аэрозольных генераторов для искусственного регулирования осадков / А.М. Петрунин, В.П. Корнеев, Б.П. Колосков, А.А. Бычков, А.В. Частухин, Б.Г. Данелян // *Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 23-27 октября 2017 г. Часть 2. Нальчик*. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – 340 с.
139. Петрунин, А.М. Перспективы использования наземных аэрозольных генераторов в Северо-Кавказской военизированной службе / А.М. Петрунин, Б.П. Колосков, А.А. Бычков, А.В. Частухин // *Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 7-9 октября 2014 г. Часть 2. Нальчик*. – Нальчик, ООО «Печатный двор», 2015. – С. 87-94.
140. Пашкевич, М.Ю. Проведение авиационных работ по улучшению погодных условий / М.Ю. Пашкевич, Н.А. Березинский, Ю.К. Лашманов // *Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 23-25 октября 2001 года*. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – С. 86-102.

141. Бычков, А.А. Исследование эффективности применения легких летательных аппаратов в составе мобильного комплекса АВ с целью искусственного увеличения осадков / А.А. Бычков, В.П. Корнеев, Б.Н. Сергеев, Г.Г. Щукин // V Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»: материалы конференции, Часть 1. – СПб.: ВКА, 2018. – С. 58-64.

142. Бычков, А.А. Использование мобильного метеорологического радиолокатора «КОНТУР-МЕТЕО-01» в работах по АВ на облака / А.А. Бычков, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев и др. // Сборник научных трудов международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь, 2013. – С. 313-316.

143. Бычков, А.А. Мобильная система активных воздействий с целью искусственного увеличения осадков / А.А. Бычков, А.М. Петрухин, А.В. Частухин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2016. – Вып. 653. – С. 67-70.

144. Бычков, А.А. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействию на облака и туманы / А.А. Бычков, В.П. Корнеев, Б.П. Колосков, А.В. Частухин, А.М. Петрухин // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященные 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. – Нальчик, 7-9 октября 2014 г. – С. 58—64.

145. Корнеев, В.П. Современное состояние и перспективы применения авиационной технологии активного воздействия на облака для метеозащиты от аномальных явлений погоды и последствий техногенных катастроф / В.П. Корнеев, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2016. – Вып. 650. – С. 109-121.

146. Хромов, С.П. Метеорологический словарь / С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – С. 301.

147. Ашабоков, Б.А. О некоторых подходах к разработке методов управления процессами осадкообразования в конвективных облаках / Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 23-27 октября 2017 г. Часть 2. Нальчик. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 116-126.

148. Ашабоков, Б.А. Численные исследования образования и роста града при естественном развитии облака и активном воздействии / Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов, Р.А. Шоранов // Метеорология и гидрология. – 1994. – №1. – С. 41-48.

149. Морозов, В.Н. К вопросу использования лазеров для регулирования грозовой активности облаков / В.Н. Морозов // Труды НИЦ-ДЗА, 2002. – Вып.4(552). – С. 19.

150. Михайловский, Ю.П. О методах активных воздействий на эмпирические явления в облаках / Ю.П. Михайловский, А.А. Синькевич // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 23-27 октября 2017 г. Часть 2. Нальчик. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 197-205.

151. Доронин, А.П. Авиационный метеорологический комплекс для активных воздействий на облака / А.П. Доронин, В.И. Дикарев и др. Патент № 2295742 от 20.03.2007 г.

152. Федоров, Е.К. Активные воздействия на метеорологические процессы /Е.К. Федоров // Вестник АН СССР. – 1962. – №9. – С. 78-85.
153. Активные воздействия на погоду // Центральной аэрологической обсерватории – 70 лет. – Долгопрудный, 2011. – С. 62-71.
154. Леонов, М.П. Активные воздействия на облака в холодное полугодие / М.П. Леонов, Г.И. Перелет. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 152 с.
155. Половина, И.П. Рассеяние переохлажденных слоистообразных облаков / И.П. Половина. – Л.: ГМИ, 1980. – 214 с.
156. Половина, И.П. Воздействия на внутримассовые облака слоистых форм / И.П. Половина. – Л.: ГМИ, 1971. – 215 с.
157. Прихотько, Г.Ф. Искусственные осадки из конвективных облаков / Г.Ф. Прихотько. – Л.: ГМИ, 1968. – 158 с.
158. Воскресенский, А.И. Применение твердой углекислоты для рассеивания облаков в Арктике / А.И. Воскресенский // Проблемы Арктики. – 1957. – Вып.2. – С. 133-139.
159. Беляев, В.И. О возможности влияния на погоду искусственным рассеиванием облачности / В.И. Беляев, Н.С. Павлова // Известия АН СССР, серия геофизическая. – М., 1962. – №1. – С. 129-132.
160. Александрова, Э.Л. Опыты по рассеянию переохлажденной облачности на больших площадях / Э.Л. Александрова // Труды ИПГ. – 1965. – Вып.1. – С. 12-18.
161. Вяльцева, В.В. Искусственное рассеяние облаков / В.В. Вяльцева // Природа. – 1961. – №11. – С. 79-83.
162. Седунов, Ю.С. Физика облаков и развитие работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы / Ю.С. Седунов // Достижения в области гидрометеорологии и контроля природной среды: Сборник статей. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – С. 34-56.
163. Доронин, А.П. Разработка рекомендаций по оптимизации применения методов и средств модификации слоистообразной облачности / А.П. Доронин, А.В. Макаров, Р.В. Шереметьев, Р.Х. Калов // Известия «КБНЦ РАН». – Нальчик, 2011. – №5(43). – С. 57-65.
164. Боровиков, А.М. К вопросу о фазовом состоянии облаков различных форм / А.М. Боровиков, Е.И. Демидова // Труды ЦАО. – 1965. – Вып. 63. – С. 29-35.
165. Кошенко, А.М. Некоторые особенности фазовой структуры фронтальных облаков над Украиной / А.М. Кошенко // Труды Укр. НИГМИ. – 1968. – Вып. 75. – С. 58-67.
166. Джураев, А.Д. Облачные ресурсы и возможности увеличения осадков в Средней Азии / А.Д. Джураев, В.П. Курбаткин, В.Ф. Ушинцева // Труды САРНИГМИ. – 1977. – Вып. 46(127). – 55 с.
167. Титов, Л.В. Микроструктура и водность облаков над Северным Казахстаном / Л.В. Титов // Сборник работ по региональной синоптике. – Алма-Аты, 1968. – Вып. 3. – С. 15-28.
168. Баранов, А.М. О расслоенности фронтальных облаков / А.М. Баранов // Метеорология и гидрология. – 1968. – №8. – С. 11-16.
169. Упорова, Л.П. Особенности расслоенности облаков над территорией СССР / Л.П. Упорова // Труды ВНИГМИ. – МЦД. – 1974. – Вып. 7. – С. 28-31.

170. Дубровина, Л.С. Облака и осадки по данным самолетного зондирования / Л.С. Дубровина. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 216 с..
171. Баранов, А.М. Фронтальные облака и условия полетов в них / А.М. Баранов. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 238 с.
172. Верзунов, В.Д. Особенности вертикального распределения облачности над территорией СССР / В.Д. Верзунов, Л.С. Дубровина // Труды НИИЛК. – 1969. – Вып. 61. – С. 54-71.
173. Дубровина, Л.С. Некоторые характеристики водности облаков над территорией СССР / Л.С. Дубровина // Труды НИИАК. – 1967. – Вып. 44. – С. 39-54.
174. Минервин, В.Е. Водозапасы облаков над ЕТС / В.Е. Минервин // Труды ВНМС. – 1963. – Т. 5. – С. 64-73.
175. Минервин, В.Е. Водозапасы облаков / В.Е. Минервин // Труды ЦАО. – 1965. – Вып. 64. – С. 44–56.
176. Пономаренко, И.Н. Водность фронтальных облаков над степной частью Украины по экспериментальным данным / И.Н. Пономаренко, Т.Н. Заболоцкая // Труды Укр. НИГМИ. – 1965. – Вып. 48. – С. 52-66.
177. Пономаренко, И.Н. Водозапасы фронтальных облаков и их приближенная оценка по метеорологическими параметрам / И.Н. Пономаренко // Информационный бюллетень «Метрология и гидрология». – 1967. – № 12. – С. 41-50.
178. Минервин, В.Е. Флюктуации водности в облаках слоистых форм / В.Е. Минервин // Труды ЦАО, 1966. – Вып. 71. – С. 92-111.
179. Атмосфера: Справочник (справочные данные, модели). – Л.: ГМИ, 1991. – 509 с.
180. Волкова, В.И. Пространственно-временная изменчивость облачности над отдельными районами СССР / В.И. Волкова // Труды ВНИИГМИ-МИД. – 1979. – Вып. 34. – С. 50-57.
181. Дубровина, Л.С. Пространственная структура облачности над Европейской территорией СССР / Л.С. Дубровина // Труды ВНИИГМИ-МИД. – Вып. 25. – С. 70-76.
182. Сонечкин, Д.М. Результаты исследования пространственно-временной изменчивости облачности над Европейской территорией СССР / Д.М. Сонечкин, И.Г. Хандурова // Труды Гидрометцентра СССР. – 1969. – Вып. 50. – С. 37-46.
183. Ионтова, Г.М. Статистическая структура поля облачности / Г.М. Ионтова, К.М. Лугина // Труды ГГО. – 1973. – Вып. 308. – С. 133-144.
184. Доронин, А.П. Исследования фазового состояния внутримассовой и фронтальной облачности над Северо-западным регионом России, применительно к проблеме активных воздействий / А.П. Доронин, М.Ю. Белевич, В.Н. Козлов, Е.Е. Кельчанский, Р.М. Шереметьев // Труды ГГО. – 2010. – Вып. 561. – С. 242-265.
185. Ружейникова, Ю.В. Аэроклиматические характеристики теплых облаков над центром Европейской территории России / Ю.В. Ружейникова // Труды НИИАК, 1970. – Вып. 66. – С. 152-156.
186. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. – М.: Гидрометеиздат, 1958. – Ч. 4. – Вып. 4. – 152 с.
187. Селезнева, Е.С. О границах вертикальной мощности конвективных облаков / Е.С. Селезнева // Труды ГГО. – 1959. – Вып. 93. – С. 9-21.
188. Славин, П.А. Термодинамика гроз / П.А. Славин. – Л.: изд. ЛВИКА им. А.Ф.Можайского, 1969. – С.27–34.

189. Синькевич, А.А. Некоторые результаты самолетных измерений термических характеристик мощных кучевых облаков, переходящих в кучево-дождевые / А.А. Синькевич // Труды ГГО. – 1989. – Вып. 497. – С. 41-50.
190. Беляев, В.И. Опыты по воздействию на погоду при засеивании тумана сухим льдом / В.И. Беляев, В.А. Вяльцев, И.С. Павлова // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1966. – Том. 2. – № 6.
191. Беляев, В.И. О Возможности влияния на погоду искусственным рассеянием облачности / В.И. Беляев, И.С. Павлова // Изв. АН СССР. – 1962. – № 1.
192. Волокитина, Л.А. Оценка повторяемости облаков, пригодных для рассеяния в районе Большого телескопа азимутального АН СССР / Л.А. Волокитина, И.В. Литвинов // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 3.
193. Литвинов, И.В. К вопросу об увеличении наблюдательного времени астрономических приборов путем рассеяния облаков / И.В. Литвинов, В.Г. Цвєрава // Астрофизические исследования. Изв. Спец. астрофизич. обсерватории. – 1985. – Вып. 19.
194. Гайворонский, И.И. Опыты по рассеянию облаков на больших площадях / И.И. Гайворонский, Ю.Л. Серегин // Труды ЦАО. – 1962. – Вып. 44. – С.15–27.
195. Белова, Л.К. Оценка ресурсов облаков, пригодных для рассеяния на Европейской территории СССР / Л.К. Белова, И.В. Литвинов, В.Г. Цвєрава // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 3. – С. 123-128.
196. Белова, Л.К. Оценка ресурсов облаков для рассеяния хладо- и кристаллизующими реагентами на Юго-западе ЕТС / Л.К. Белова, Л.А. Волокитина, И.В. Литвинов // Метеорология и гидрология. – 1986. – № 9..
197. Белова, Л.К. Районирование территории СССР для возможного рассеяния облаков твердой углекислоты / Л.К. Белова, И.В. Литвинов, В.Г. Цвєрава // Метеорология и гидрология. – 1986. – № 1.
198. Белова, Л.К. Годовой ход числа случаев с облаками, пригодными для рассеяния твердой углекислотой на Европейской территории СССР / Л.К. Белова, И.В. Литвинов, В.Г. Цвєрава // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 11.
199. Дубинчик, С.К. Оценка возможности рассеяния облаков и туманов при температурах выше минус 3°С / С.К. Дубинчик // Труды Укр. НИГМИ. – 1972. – Вып. 114. – С. 113-123.
200. Половина, И.П. О некоторых вопросах эффективности рассеяния слоистообразных облаков и туманов / И.П. Половина, Е.И. Кравченко, С.К. Кудрявцева, Б.Н. Лесков, В.Н. Подгурская, А.С. Яковленко // Труды Укр. НИГМИ. – 1983. – Вып. 193.
201. Gerdel R.W. Note of the use of lignified propane for fog dispersal at the Medford Jackson airport Oregon // Journal of Applied meteorology. – 1968. – vol. 7. – № 1. – P. 1039-1040.
202. Бурцев, И.Н. Искусственные воздействия на метеорологические процессы во Франции / И.Н. Бурцев // Труды ВГИ. – 1973. – Вып. 22. – С. 3-11.
203. Литвинов, И.В. Возможность искусственного преобразования облаков и осадков центрального района Европейской территории Советского Союза / И.В. Литвинов // Труды ИЭМ. – 1970. – Вып. 19. – С. 27-49.
204. Джураев, А.Д. Активные воздействия на переохлажденные облака в горах Средней Азии / А.Д. Джураев, В.Ф. Ушинцева // Труды САРНИГМИ. – 1969. – Вып. 46. – С. 3-6.

205. Сумин, Ю.П. Исследование зимней слоистообразной облачности в Целинном крае / Ю.П. Сумин // Исследование по физике облаков и активных воздействий на погоду. – М.: Гидрометеиздат, 1967. – С. 100-107.
206. Кондратова, Л.В. Оценка водозапаса переохлажденных облаков слоистых форм, не дающие осадков / Л.В. Кондратова // Труды ИЭМ, 1968. – Вып. 3. – С. 44-54.
207. Половина, И.П. Оценка возможного количества осадков при засева внутримассовых облаков / И.П. Половина // Труды Укр. НИГМИ. – 1989. – Вып. 89.
208. Воронов, Г.С. К вопросу о возможности рассеяния переохлажденных слоистых форм и туманов большой вертикальной протяженности / Г.С. Воронов // Труды Укр. НИГМИ. – 1985. – Вып. 214. – С. 83-91.
209. Воронов, Г.С. К вопросу о возможности рассеяния переохлажденных облаков слоистых форм и туманов большой вертикальной протяженности / Г.С. Воронов // Труды Укр. НИГМИ. – 1985. – Вып. 206. – С. 56-67.
210. Joe L. Sutherland, John R. Thompson and Don A. Griffith. Seeding tests on super cooled stratus using vertical foll pyrotechnics // J. Appl. Met. – 1980. – vol. 21. – № 2. – P. 248-251.
211. Литвинов, И.В. Перераспределение осадков за счет воздействия / И.В. Литвинов // Труды ИПГ. – 1967. – Вып. 7.
212. Haman H.E. Physical problems of weather modification // Hydrological Sciences Bulletin. – 1976. – vol. 21. – № 4, 12. – P. 587-602.
213. Morris Neibinger, Helmut Weickman. The meteorological background for weather and climate modification // Weather and climate modification. New-York. – 1974. – P. 93-135.
214. Лесков, Б.Н. К вопросу о границах применимости метода воздействия на фронтальные облака с целью увеличения осадков / Б.Н. Лесков // Труды Укр. НИГМИ. – 1969. – Вып. 77. – С. 116-123.
215. Лесков, Б.Н. К вопросу о пригодности к засева фронтальных облаков / Б.Н. Лесков // Труды Укр. НИГМИ. – 1974. – Вып. 133. – С. 123-127.
216. Лесков, Б.Н. Предварительные данные об условиях, при которых возможно рассеяния фронтальных облаков / Б.Н. Лесков, И.П. Половина // Труды Укр. НИГМИ. – 1972. – Вып. 118. – С. 129-134.
217. Петухов, Г.Б. Основные теории эффективности целенаправленных процессов. Часть 1. Методология. Методы, модели / Г.Б. Петухов. – Министерство обороны СССР. – 1989. – 650 с.
218. Ожегов, С.И. Словарь русского языка / С.И. Ожегов. – М.: Русский язык, 1987. – 738 с.
219. Ким, Н.С. Анализ экологической безопасности российских технологий активных воздействий на облака / Н.С. Ким, В.П. Корнеев, А.В. Частухин, Г.Г. Щукин // Материалы III Всероссийской научной конференции «Экология и космос» имени академика К.Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2017. – С. 207-213.
220. Потапов, Е.И. Влияние долговременных работ по активным воздействиям на градовые процессы в Республике Молдова на содержание компонентов кристаллизующих реагентов в Республике Молдова и характеристики ледяных ядер / Е.И. Потапов // Вопросы физики облаков. Атмосферные аэрозоли, активные воздействия : сборник статей памяти Н.О. Плауде. – Обнинск, ФГБУ «ВНИИГМИ-МИД», 2015. – С. 281-303.

221. Корнеев, В.П. Экологические аспекты искусственного регулирования атмосферных осадков / В.П. Корнеев, Е.И. Потапов, Г.Г. Щукин // Метеорология и гидрология. – 2017. – №7. – С. 112-122.

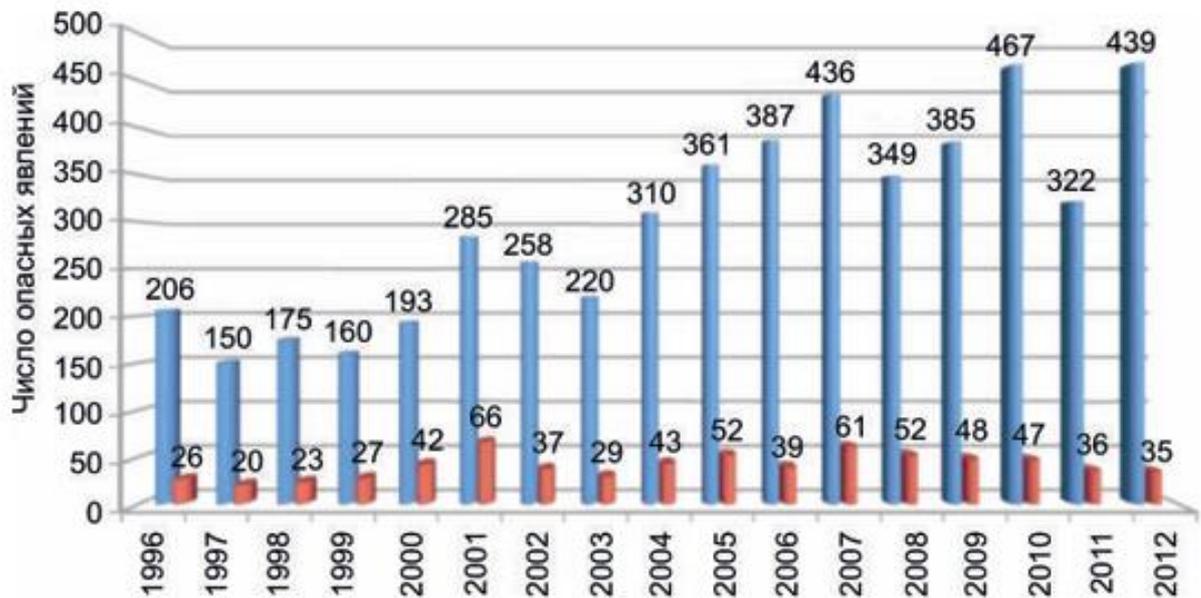
222. Доронин, А.П. Оценивание возможного негативного влияния химических реагентов, используемых при воздействии на геофизические процессы / А.П. Доронин, М.Ю. Ортиков, В.Н. Подгайский, И.В. Гончаров. Деп. в ЦВНИ МО РФ серия В. – М.: ЦВНИ МО РФ, 1997, инв. 3208. – Вып. 38. – 21 с.

223. Environment impacts of artificial ice nucleating agents. Edited by Doinald A. Klein. Colorado State University. – 1978. – 256 p.

224. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р.М.Юсупова. – МО СССР, 1984. – 563 с.

225. Заварина, М.В. Некоторые характеристики солоистообразных облаков в зоне недостаточного увлажнения Европейской территории СССР / М.В. Заварина, М.А. Гауль // Труды ГГО. – 1966. – Вып. 200. – С. 88-94.

Рисунок А.1. Изменение числа опасных явлений, причинивших ущерб, на территории Российской Федерации 1996—2012 гг.



А.2. Апробация работы:

Результаты исследований докладывались и обсуждались на IX Международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), II Всероссийской научной конференции «Экология и космос» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.), Всероссийской ежегодной научной конференции «Проблемы повышения эффективности управления авиационными частями и соединениями ВВС» (г. Воронеж, 9 – 10 апреля 2015 г.), Межвузовском научно-практическом семинаре «Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства» (г. Санкт-Петербург, 16 апреля 2015 г.), II Всероссийской научно-практической конференции «Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга» (г. Воронеж, 2015 г.), IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), III Всероссийской конференции имени академика К.Я. Кондратьева «Экология и космос» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), IX Санкт-Петербургской межрегиональной конференции «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2015)» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.), IX Санкт-Петербургской межрегиональной конференции «Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2017)» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), XIV Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология» (г. Казань, 2002 г.), XIII Всероссийской межвузовской

научно-технической конференции «Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология» (г. Казань, 2001 г.), XI научно-прикладной международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.).

Приложение Б

Таблица Б.1

Чрезвычайные ситуации, создаваемые опасными метеорологическими явлениями по крупным регионам России (в %)

Поражающие факторы	Европейская часть России (без Северного Кавказа)	Северный Кавказ	Урал и Сибирь	Забайкалье и Дальний Восток	Россия в целом
летом					
Ветер	50	11	55	17	38
Ветер и ливень	2	4	-	5	2
Ливень	27	42	30	74	39
Ветер, ливень, град	3	7	5	2	2
Град и ливень	18	36	10	2	19
зимой					
Ветер, в том числе при гололеде	48	40	67	58	53
Снегопад, обилие снега	38	20	22	25	27
Метель	14	40	11	17	20

Таблица Б.2

Сводная информация о количестве грозовых дней по Ростовской области

Месяц	Количество дней с грозой			
	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.
Январь	0	0	1	0
Февраль	0	0	0	0
Март	3	1	0	0
Апрель	9	0	4	2
Май	20	14	26	15
Июнь	18	15	14	22
Июль	17	19	19	18
Август	12	16	9	13
Сентябрь	8	12	10	14
Октябрь	1	2	1	0
Ноябрь	0	0	2	0
Декабрь	1	0	0	0
ВСЕГО	89	79	86	84

Таблицы Б.1 и Б.2 взяты из лекции «Геофизические методы решения экологических проблем, связанных с чрезвычайными ситуациями природного и

техногенного характера», автор – профессор 52 кафедры Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского Доронин А.П. СПб, 2011. – 30 с.

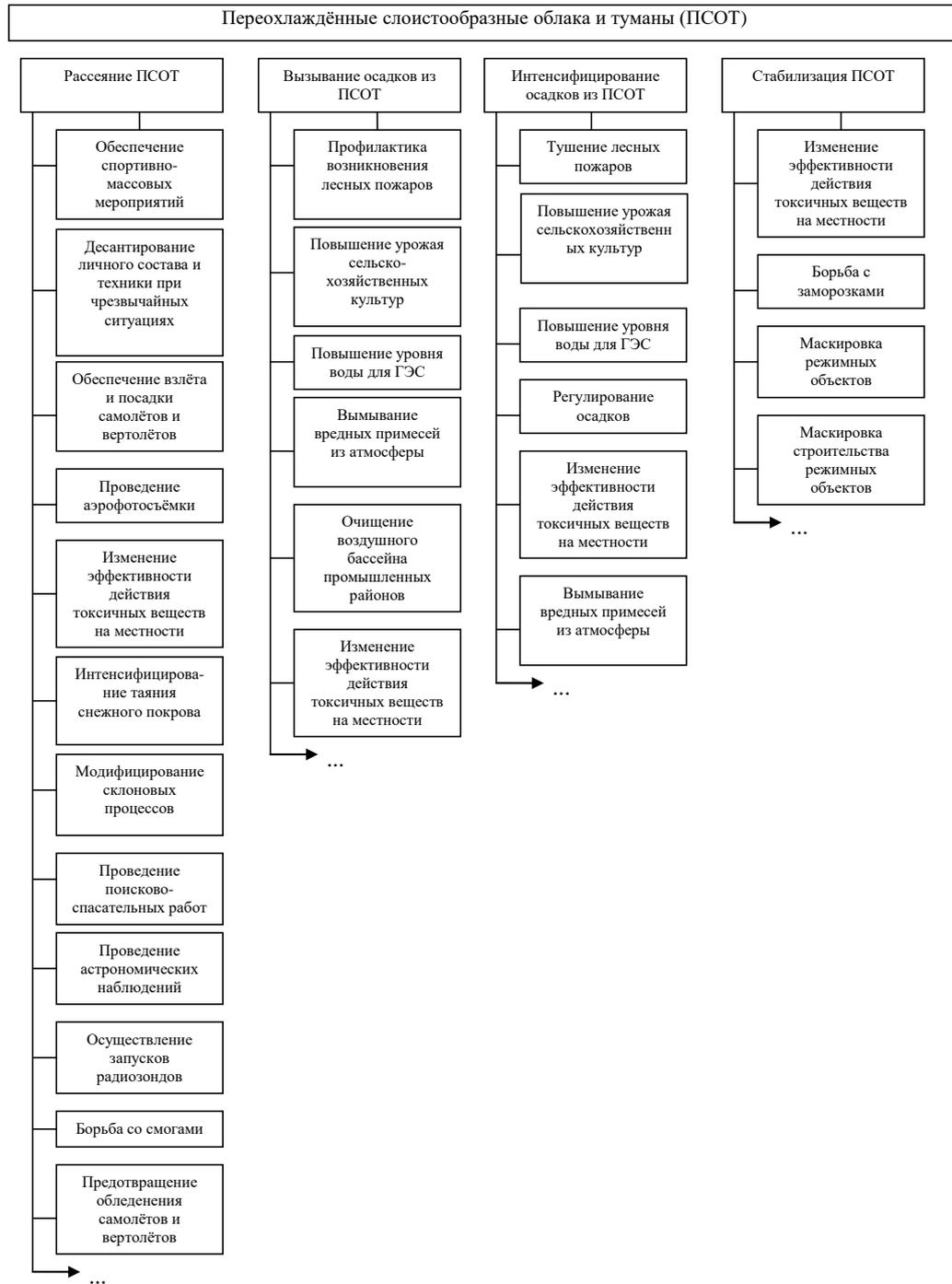


Рисунок Б.1. Перечень хозяйственных и экологических задач, решаемых при воздействии на переохлаждённые слоистообразные облака и туманы

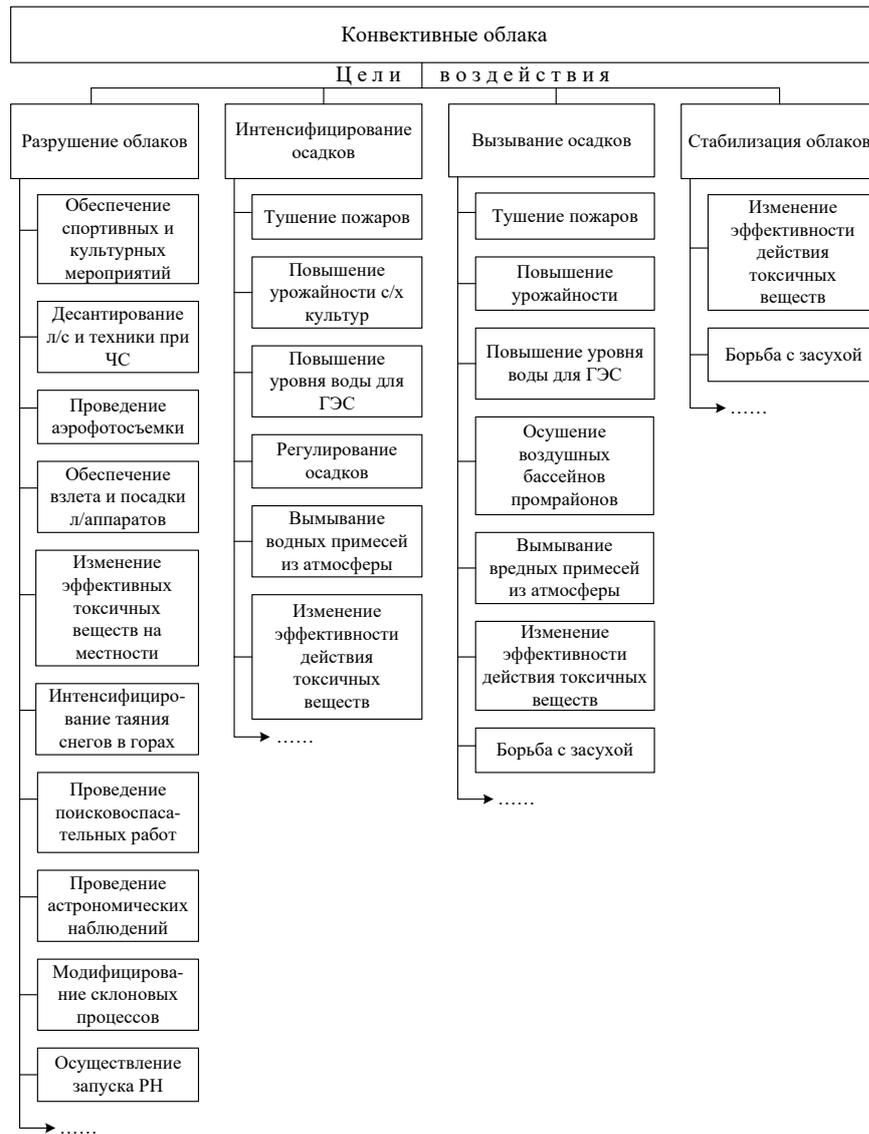


Рисунок Б.2. Перечень хозяйственных и экологических задач, решение которых возможно при воздействии на конвективные облака

Таблица Б.3 – Способы и методы воздействия на переохлажденные волнистообразные облака

Наименование метода	Приоритет страны	Перспективность применения метода для решения прикладных задач
1. Тепловой способ и методы воздействия на ПВОБЛ		
1.1 Метод неконтролируемого поступления тепла (сжигание топлива в трубах или в траншеях вдоль ВПП)	(применялся в Англии в ходе II мировой войны)	+ (в условиях полевых аэродромов)

Наименование метода	Приоритет страны	Перспективность применения метода для решения прикладных задач
1.2 Метод контролируемого поступления тепла		
1.2.1. Тепловые системы на основе авиационных двигателей и др.	Пат.Франции № 2202986 МПК7 Е 01Н13/00, 1974; Пат.США №4125223 МПК7 Е 01 Н13/03, 1997	+
1.2.2 Подача тепла в трубы, проложенные в плитах ВВП	Пат РФ №2083442 МПК6 64 F 1/00,Е 01 С 11/26, 10.07.1997	+
1.3 Метод с использованием ИК-излучения	Пат РФ №2288317 МПК Е 01Н 13/00, А 01 G 15/00, 27.11.2006	+
2. Механический способ и методы воздействия на ПВОБЛ		
2.1 Метод с применением акустических колебаний	Пат РФ №2169228 Б ИПМ №17, 2001	+
2.2 Метод на основе подрыва заряда	(«Изменение погоды человек», перевод с англ. Л.:Прогресс, 1957.– с.19-21	+
2.3 Метод на основе применения сжатого воздуха	Пат РФ №2088427 МПК6 Кл. А 01 G 15/00, 20.07.1997	+
3. Химический способ и методы воздействия на ПВОБЛ		
3.1 Метод применения хладореагентов		
3.1.1 Применение твердой углекислоты (новый метод применения CO ₂)	Пат РФ №1702558 МПК6 Кл. А 01 G 15/00, 20.01.1995	+
3.1.2 Применение жидкой углекислоты	Пат РФ №1702558 МПК6 Кл. А 01 G 15/00, 22020.01.1995	+
3.1.3 Диспергирование частиц твердой углекислоты с большой скоростью (от 100 до 200м/с)	Пат. Германии №10005898 Кл. А 01G 15-00, 17.05.2001	+
3.2 Метод применения кристаллов воды (твердая H ₂ O), диспергирование с большой скоростью (100-200 м/с)	Пат. Германии № 10135400 Кл. А 01G 15-00, 20.02.2003	+
3.3 Метод применения кристаллизующих реагентов		+
3.4 Метод применения пропана		+
3.5 Метод применения гигроскопических реагентов		-
3.6 Метод применения ПАВ (поверхностно-активных веществ)		-
3.7 Метод применения универсальных реагентов		+

Наименование метода	Приоритет страны	Перспективность применения метода для решения прикладных задач
3.8 Метод применения жидкого азота		
3.8.1 Применение жидкого азота (в чистом виде)	Пат РФ №2120731 МПК6 Кл. А 01 G 15/00, Е 01Н 13/00, 27.10.1998	+
3.8.2 Применение пористых веществ, охлажденных жидким азотом		+
3.9. Метод применения раствора соли тетроалкиламмония во фреоне	Пат РФ №2101920 МПК6 А 01 G 15/00, 20.01.1998	
4. Лазерный способ и методы воздействия на ПВОБЛ		
4.1 Метод применения СВЧ-излучения		-
4.2 Метод применения ОКГ (оптико-квантовых генераторов)		-
5. Электрический способ и методы воздействия на ПВОБЛ		
5.1 Метод применения заряженных частиц песка		-
5.2 Метод применения электрических полей		-
6. Прочие методы воздействия на ПВОБЛ		
6.1 Метод применения ПАВ для уменьшения испарения с водной поверхности (предотвращение образования тумана)		+
6.2 Метод применения электрически заряженных частиц с одновременным нагревом атмосферного воздуха над поверхностью земли	Пат РФ №2245026 МПК7 А 01 G 15/00, Е 04Н 13/00, 27.01.2005	-
6.3 Метод одновременного применения звуковых волн и реагентов засева	Пат РФ №2169228 МПК7 А 01 G 15/00, Е 01Н 13/00, 20.06.2001	+

Приложение В

В 1 – Характеристика исходного материала и методика его обработки для создания базы данных с целью исследования переохлажденной облачности применительно к проблеме активных воздействий

Практика работ по воздействию на облака в нашей стране [см. например, 4-5], в странах СНГ [16-17] и за рубежом [2, 6, 18, 19] убедительно показала, что успех (достижение цели) во многом зависит от полноты знаний об их характеристиках. Различие в методах и средствах воздействия на облака вследствие подразделения их по температуре на теплые (наблюдаются при значениях температуры воздуха выше 0°C) и переохлажденные (наблюдаются при значениях температуры воздуха ниже 0°C) вызвало необходимость проведения работ по детальному изучению характеристик этих

атмосферных образований применительно к проблеме активных воздействий (АВ) на атмосферные процессы и явления.

К настоящему времени наиболее полно изучены характеристики переохлажденных облаков (волнистообразных и слоистообразных), главным образом, для районов Украины [154-157], Средней Азии [166], Крыма [159-161], Арктики [158]. Ряд работ выполнен применительно к Европейской части РФ [8-9].

Вместе с тем отсутствуют работы, в которых проведено оценивание ресурсов переохлажденной облачности (волнистообразных, слоистообразных, конвективных) для конкретных ФГР нашей страны и, в частности, для центрального района ЕТР. Исходя из этого, в настоящей работе в качестве объекта исследования выбраны волнистообразные (только слоистые (St) и слоисто-кучевые облака (Sc)), слоистообразные (только слоисто-дождевые (Ns) и высоко-слоистые (As)) и конвективные (только мощно-кучевые (Cu cong.)) облака.

К волнистообразным облакам были отнесены слоистые и слоисто-кучевые облака, наблюдающиеся как самостоятельно, так и в сочетании с высоко-кучевыми (Ac) облаками. Поскольку Ac облака редко бывают сплошными, в дальнейшем их характеристики, как правило, во внимание не принимались [100].

При определении слоистообразных облаков рассматривались два их класса. К первому классу – слоисто-дождевые облака – относились Ns, наблюдающиеся как самостоятельно, так и в сочетании с другими формами облаков, включая и высоко-слоистые.

Ко второму классу – высоко-слоистые облака – относились As, наблюдающиеся как самостоятельно, так и с другими формами облаков, кроме Ns.

Обоснование выбора в качестве объекта воздействия облаков конвективных форм приведено в п. 2.5 диссертации.

При рассмотрении вопроса о целесообразности проведения воздействия на облака в том или ином районе необходимы сведения об их основных характеристиках, среди которых особое место отводится данным о повторяемости облаков различных форм. Данные об относительной повторяемости облаков различных форм над центральным районом ЕТР, приведенные в таблице В.1, получены на основе обработки материалов самолетного зондирования атмосферы (СЗА) ТАЭ-7,7м над аэропортом Внуково за 1953-1964 гг. Всего обработано около 6 тысяч (5873) подъемов самолетов-зондировщиков. Использование материалов СЗА для исследования характеристик облаков различных форм применительно к проблеме АВ, как показано Завариной М.В. и Гаулем М.Л. [225], вполне оправдано. Авторы в своей работе пришли к выводу о том, что материалы СЗА достаточно хорошо отражают распределение облачности, и полученные по ним характеристики облаков является вполне надежными.

Анализ данных, приведенных в таблице В.1, наглядно свидетельствует о том, в холодное полугодие (и, особенно зимой) над выбранным районом преобладающими формами облаков являются волнистообразные (St-Sc облака) и слоистообразные (Ns и As). Так, на повторяемость только St-Sc облаков (одно- и многослойные) приходится в холодное полугодие 45,7% (зимой – 46,3%), а на повторяемости Ns и As облаков – 19,1 и 17,8% соответственно (зимой – 19,8 и 17,6%).

В теплое полугодие (и, особенно, летом) преобладают облака конвективных форм. На повторяемость таких облаков, наблюдающихся как самостоятельно, так и в сочетании с

другими формами облаков приходится в теплое полугодие 27,3%, а летом – 39,3%. Следовательно, можно сделать вывод о том, что в холодное полугодие основными объектами воздействия могут быть, главным образом, волнистообразные и слоистообразные облака, а в теплое – конвективные облака.

Таблица В.1

Относительная повторяемость (%) сплошной облачности различных форм в районе
Москвы

Сезон, полугодие	Наблюдаются							Число случаев	
	Только (одно- многослойные)	St-Sc и	St-Sc в сочетании с Ac	Ns, Ns- As	As	Ac	Только Cu, Cb		Cu, Cb в сочетании с другими формами
Зима	46,3		11,7	19,8	17,6	4,3	0,1	0,2	1645
Лето	11,8		8,0	7,9	11,4	18,8	20,5	21,6	1350
Холодное	45,7		12,0	19,1	17,8	4,5	0,2	0,7	2585
Теплое	22,7		8,8	11,2	13,9	16,1	12,7	14,6	3288

Данные о характеристиках облаков, в частности волнистообразных и слоистообразных, полученные в одном пункте зондирования могут быть использованы для описания параметров облачности на территории площадью с радиусом в 300-500 км от места зондирования. Основанием к такому подходу могут служить результаты исследований ряда авторов [180-183], посвященных изучению пространственно-временной изменчивости характеристик облачности. В них, в частности, показано, что для полей волнистообразных и слоистообразных облаков свойственно пространственная взаимосвязь, особенно четко выраженная в холодное полугодие. Так, проверка корреляционных функций на изотропность [181, 183] показала, что поле облачности изотропно вплоть до расстояния 600 км зимой и до 400-500 км – летом. Кроме того, исследование временной устойчивости состояний таких облаков показало, что вероятность сохранения, например, сплошных волнистообразных облаков над центральным, северным и северо-западными районами России зимой в течение 24 часов составляет 0,75 [180].

Следовательно, можно сделать вывод о том, что характеристики волнистообразных и слоистообразных облаков, полученные для одного пункта, могут характеризовать ее на значительной территории (десятки – сотни тысяч км²). В связи с этим характеристики таких облаков, полученные в пункте зондирования Внуково могут быть отнесены к центральному району ЕТР.

Привлечение материалов СЗА объясняется тем, что достаточно надежные данные о пространственной структуре облаков и их характеристиках можно получить только с помощью самолетов [170].

Методика проведения наблюдений и измерений с помощью самолета-зондировщика описана в Наставлении [186].

Статистические характеристики волнистообразных и слоистообразных облаков рассчитывались по месяцам (ноябрь-март), для зимы (декабрь-февраль) и холодного полугодия отдельно для облаков с осадками у земли и без осадков, а конвективных облаков по месяцам (апрель-сентябрь), для лета (июнь-август) и теплого полугодия.

Оценивание пригодности волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков к воздействию с целью вызывания (интенсифицирования) и рассеяния (разрушения) проводилось по критериям, приведенных в главе 3 диссертации.

При статистическом исследовании характеристик ВОБЛ использовались следующие числовые характеристики случайных величин \hat{s} :

$M_{\hat{s}}$ – математическое ожидание;

$\sigma_{\hat{s}}$ – среднее квадратическое отклонение;

$V_{\hat{s}}$ – коэффициент вариации.

Для оценивания надежности и достоверности числовых характеристик применялась стандартная ошибка величин $M_{\hat{s}}$ и $\sigma_{\hat{s}}$.

Расчеты выполнялись по следующим формулам [224]:

$$M_{\hat{s}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i.$$

$$\sigma_{\hat{s}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - \tilde{M}_{\hat{s}})^2}.$$

$$V_{\hat{s}} = \frac{\tilde{\sigma}_{\hat{s}}}{\tilde{M}_{\hat{s}}} \cdot 100\%.$$

$$\tilde{\sigma}_{\hat{M}_{\hat{s}}} = \frac{\tilde{\sigma}_{\hat{s}}}{\sqrt{n-1}}.$$

$$\tilde{\sigma}_{\hat{\sigma}_{\hat{s}}} = \frac{\tilde{\sigma}_{\hat{s}}}{\sqrt{2n-1}}.$$

Результаты обработки данных СЗА, представленные в соответствующих подразделах диссертации явились основой для формирования базы данных о характеристиках волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаках применительно к проблеме активных воздействий.

Список литературных источников к данному Приложению дается из основного списка литературы по диссертации.

Приложение Г

Таблица Г.1

Повторяемость (%) числа облачных слоев переохлажденных волнистообразных облаков, пригодных к рассеянию

Наличие (отсутствие) осадков	Месяцы																Зима	Холодное полугодие				Число зонди- рований							
	XI				XII				I				II					III											
	Число облачных слоев																												
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Без осадков	70,3	23,2	5,8	0,7	61,8	26,5	11,1	0,6	66,5	26,7	4,2	2,6	70,6	23,8	4,8	0,8	63,8	28,6	5,9	1,7	66,0	25,9	6,7	1,4	66,4	25,8	6,4	1,4	736
С осадками	56,7	32,8	6,0	4,5	63,4	30,9	4,9	0,8	48,5	37,9	8,7	4,9	47,2	37,1	10,0	5,7	53,5	27,9	11,6	7,0	54,4	34,8	7,4	3,4	54,7	33,8	7,6	3,9	406
В целом	65,9	26,3	5,8	2,0	62,5	28,4	8,4	0,7	60,2	30,6	5,8	3,4	62,2	28,6	6,6	2,6	61,1	28,4	7,4	3,1	61,5	29,3	7,0	2,2	62,3	28,6	6,8	2,3	1142

Таблица Г.2

Повторяемость (%) числа облачных слоев переохлажденных волнистообразных облаков, пригодных к вызыванию осадков

Пункты	ВНГО, м	Месяцы															Зима	Холодное полугодие			Число зондирований						
		XI					XII					I						II					III				
		Число облачных слоев																									
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3					
Внуково	≤1000	94,3	4,3	1,4	93,5	6,5	-	92,3	7,7	-	96,7	3,3	-	88,0	12,0	-	93,9	6,1	-	93,1	6,6	0,3	364				
	≤1500	95,3	3,5	1,2	94,3	5,7	-	93,3	6,7	-	97,1	2,9	-	90,3	9,7	-	94,6	5,4	-	94,2	5,6	0,2	426				
	≤2000	95,5	3,4	1,1	94,7	5,3	-	93,6	6,4	-	97,1	2,9	-	89,4	10,6	-	94,9	5,1	-	94,2	5,6	0,2	447				

Таблица Г.3

Повторяемость (%) числа облачных слоев слоистообразных облаков, пригодных к вызыванию осадков

Пункт	ВНГО, м	Месяцы										Зима	Холодное полугодие		Число зонди- рований	
		XI		XII		I		II		III						
		Число облачных слоев														
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Внуково	≤1000	87,5	12,5	81,3	18,7	76,5	23,5	91,7	8,3	100,0	-	84,2	15,8	87,7	12,3	81
	≤1500	88,9	11,1	85,0	15,0	77,8	22,2	92,9	7,1	100,0	-	86,4	13,6	89,2	10,8	93
	≤2000	90,9	9,1	87,5	12,5	78,9	21,1	93,5	6,5	100,0	-	87,8	12,2	90,4	9,6	104

Таблица Г.4

Повторяемость (%) числа облачных слоев слоистообразных облаков, пригодных к интенсифицированию осадков

Пункт	ВНГО, м	Месяцы										Зима		Холодное полугодие		Число зонди- рований
		XI		XII		I		II		III						
		Число облачных слоев														
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Внуково	≤1000	88,6	11,4	87,7	12,3	88,9	11,1	88,5	11,5	96,9	3,1	88,4	11,6	90,4	9,6	280
	≤1500	90,7	9,3	87,3	12,7	90,4	9,6	88,7	11,3	97,3	2,7	88,8	11,2	91,0	9,0	333
	≤2000	91,7	8,3	88,8	11,2	92,1	7,9	89,3	10,7	97,5	2,5	90,2	9,8	92,0	8,0	373

Таблица Г.5

Повторяемость (%) числа облачных слоев слоистообразных облаков, пригодных к рассеянию

Пункты	Вид облачности	Месяцы															Зима			Холодное полугодие			Число зонди- рований
		XI			XII			I			II			III									
		Число облачных слоев																					
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Внуково	без осадков	66,7	33,3	-	-	57,1	42,9	10,0	30,0	60,0	33,3	50,0	16,7	50,0	33,3	16,7	13,1	56,5	30,4	23,5	53,0	23,5	91

Таблица Г.6

Средние значения характеристик переохлажденных волнистообразных облаков

Сезон, полугодие	Характеристики облаков						
	$\tau_{ос}, ч.$	$\tau, ч.$	K	$\Delta H, м$	$q_{ср}, г/м^3$	n	a
Зима	2/3	15,8	0,75	440	0,20	24	0,49
Холодное полугодие	2/3	15,0	0,75	440	0,20	38	0,46
Источник заимствования	[154-156]	[180-182]	[154-156]	получено автором	получено автором	[170]	получено автором

Таблица Г.7

Средние значения характеристик переохлажденных слоистообразных облаков

Сезон, полугодие	Характеристики облаков							
	$\frac{A}{A'}$	$\frac{K_{\Pi}}{K_{H}}$	$\frac{\tau_{\Pi}}{\tau_{H}}$, ч	$\frac{\Delta H_{\Pi}}{\Delta H_{H}}$, с	$\frac{q_{\Pi}}{q_{H}}$	n_2	a_2	τ_{oc} , ч
Зима	$\frac{0,39}{0,08}$	$\frac{0,75}{0,50}$	$\frac{15,8}{12,0}$	$\frac{672}{169}$	$\frac{0,24}{0,19}$	11	0,35	2/3
Холодное полугодие	$\frac{0,34}{0,06}$	$\frac{0,75}{0,50}$	$\frac{15,0}{12,0}$	$\frac{641}{212}$	$\frac{0,24}{0,22}$	19	0,31	2/3
Источник заимствования	получено автором	[154-156]	[180-182]	получено автором	получено автором	получено автором	получено автором	[154-156]

Таблица Г.8

Расчет количества дополнительных осадков при интенсифицировании естественных осадков из слоистообразных облаков

Сезон, полугодие	Характеристики слоистообразных облаков			
	b	\bar{R}_{oc} , мм	$R_{инт}$, мм	% от нормы
Зима	0,50	133,0	66,8	50,2
Холодное полугодие	0,50	227,0	114,2	50,3

Таблица Г.9

Статистические оценки числовых характеристик распределения мощности пригодных к рассеянию волнистообразных облаков

Сезон, полугодие	Вероятность попадания в градацию, %										Среднее, \bar{s}^*	σ_s^*	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\sigma_{\bar{s}}}^*$	V, %	Число случаев
	1-100	101- 200	201- 300	301- 400	401- 500	501- 600	601- 700	701- 800	801- 900	901- 1000						
Зима	<u>16,6</u>	<u>23,3</u>	<u>18,9</u>	<u>15,4</u>	<u>10,2</u>	<u>6,5</u>	<u>3,9</u>	<u>3,4</u>	<u>1,8</u>	<u>0</u>	<u>300</u>	<u>200</u>	<u>8,2</u>	<u>5,8</u>	<u>65,1</u>	<u>566</u>
	14,3	24,4	15,1	12,5	7,8	9,3	7,3	4,9	2,1	2,3	340	240	12,0	8,5	68,3	385
Холодное	<u>16,9</u>	<u>23,1</u>	<u>19,8</u>	<u>16,3</u>	<u>9,8</u>	<u>5,7</u>	<u>4,2</u>	<u>3,3</u>	<u>0,9</u>	<u>0</u>	<u>290</u>	<u>190</u>	<u>6,5</u>	<u>4,6</u>	<u>64,0</u>	<u>854</u>
	15,8	24,1	13,9	12,2	8,5	10,0	6,8	4,1	2,3	2,3	340	230	10,2	7,2	69,1	531

Примечание. В числителе приведены данные, относящиеся к облакам без осадков, в знаменателе – с осадками.

Таблица Г.10

Статистические оценки числовых характеристик распределения мощности пригодных к вызыванию осадков волнистообразных облаков

Сезон, полугодие	Вероятность попадания в градацию, %								Среднее, \bar{s}^*	σ_s^*	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\sigma_{\bar{s}}}^*$	V, %	Число случаев
	250-300	301-400	401-500	501-600	601-700	701-800	801-900	901- 1000						
Зима	23,2	29,9	19,9	10,0	7,0	6,0	4,0	0	440	160	9,3	6,6	36,6	301
Холодное	24,2	31,1	19,1	8,4	7,8	6,1	3,3	0	440	160	7,5	5,3	36,7	462

Таблица Г.11

Статистические оценки числовых характеристик распределения средней для облачного слоя температуры пригодных к рассеянию волнистообразных облаков

Сезон, полугодие	Вероятность попадания в градацию, %										Среднее, \bar{s}^*	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\sigma_{\bar{s}}}^*$	V, %	Число случаев
	-3,1... -5,0	-5,1... -7,0	-7,1... -9,0	-9,1... 11,0	-11,1... -13,0	-13,1... -15,0	-15,1... -17,0	-17,1... -19,0	-19,1... -21,0	-21,1... -23,0						
Зима	<u>14,2</u>	<u>18,1</u>	<u>22,6</u>	<u>19,5</u>	<u>10,5</u>	<u>5,7</u>	<u>3,6</u>	<u>2,8</u>	<u>3,0</u>	<u>0</u>	<u>-9,2</u>	<u>-3,9</u>	<u>0,17</u>	<u>0,12</u>	<u>42,9</u>	<u>563</u>
	6,3	12,6	14,9	15,9	21,9	12,3	8,1	4,5	2,4	1,1	-11,0	-4,0	0,21	0,15	36,8	382
Холодное	<u>15,4</u>	<u>20,1</u>	<u>22,2</u>	<u>20,1</u>	<u>11,6</u>	<u>5,4</u>	<u>3,1</u>	<u>2,1</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>-8,7</u>	<u>-3,4</u>	<u>0,12</u>	<u>0,08</u>	<u>39,2</u>	<u>840</u>
	7,0	12,9	16,1	16,6	19,5	12,1	8,3	4,6	1,9	1,0	-10,8	-4,0	0,18	0,12	37,4	528

Примечание. В числителе приведены данные, относящиеся к облакам без осадков, в знаменателе – с осадками.

Таблица Г.12

Статистические оценки числовых характеристик распределения средней для облачного слоя температуры пригодных к вызыванию осадков волнистообразных облаков

Сезон, полугодие	Вероятность попадания в градацию, %						Сред нее, \bar{s}^*	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\sigma_{\bar{s}}}^*$	V, %	Числ о случ аев
	-4,0... -6,0	-6,1... -8,0	-8,1... -10,0	-10,1... -12,0	-12,1... -14,0	-14,1... -16,0						
Зима	22,4	26,9	27,2	16,1	6,3	1,1	-8,2	-2,5	0,15	0,11	30,1	286
Холодное	23,1	27,8	23,7	17,3	6,1	2,0	-8,3	-2,6	0,12	0,09	31,7	446

Таблица Г.13

Статистические оценки числовых характеристик распределения мощности пригодных к вызыванию осадков слоистообразных облаков

Сезон, полугодие	Вероятность попадания в градацию, %													Среднее, \bar{s}^*	σ_s^*	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\sigma_{\bar{s}}}^*$	V, %	Число случаев
	250- 500	501- 750	751- 1000	1001- 1250	1251- 1500	1501- 1750	1751- 2000	2001- 2250...	2501- 2750...	3001- 3250	3251- 3500	3501- 3750...	4501- 4750						
Зима	44,9	23,2	11,6	8,7	10,1	1,5	0	0	0	0	0	0	0	670	370	44,3	31,2	54,4	69
Холодное	46,3	22,1	13,7	10,5	7,4	0	0	0	0	0	0	0	0	640	330	33,8	23,9	51,1	95

Таблица Г.14

Статистические оценки числовых характеристик распределения мощности пригодных к интенсифицированию осадков слоистообразных облаков

Сезон, полугодие	Вероятность попадания в градацию, %												Среднее, \bar{s}^*	σ_s^*	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\sigma_{\bar{s}}}^*$	V, %	Число случаев
	250-700	701- 1150	1151- 1600	1601- 2050	2051- 2500	2501- 2950	2951- 3400	3401- 3850	3851- 4300	4301- 4750	4751- 5200	5201- 5650						
Зима	39,1	21,3	15,0	7,9	5,4	4,6	3,8	2,9	0	0	0	0	1190	870	56,5	39,9	73,2	240
Холодное	38,1	23,0	12,6	8,8	6,0	4,9	3,9	2,7	0	0	0	0	1210	880	46,0	32,5	72,4	365

Таблица Г.15

Статистические оценки числовых характеристик распределения средней для облачного слоя температуры пригодных к вызыванию осадков слоистообразных облаков

Сезон, полугодие	Вероятность попадания в градацию, %							Среднее, \bar{s}^*	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\sigma_{\bar{s}}}^*$	V, %	Число случаев
	-4,0... -6,0	-6,1... -8,0	-8,1... -10,0	-10,1... -12,0	-12,1... -14,0	-14,1... -16,0	-16,1... -18,0						
Зима	15,1	24,6	28,8	12,3	9,6	6,9	2,7	-9,1	-3,0	0,36	0,25	33,4	73
Холодное	23,0	24,0	26,0	13,0	7,0	5,0	2,0	-8,6	-2,9	0,30	0,21	34,2	100

Таблица Г.16

Статистические оценки числовых характеристик распределения средней для облачного слоя температуры пригодных к интенсификации осадков слоистообразных облаков

Сезон, полугодие	Вероятность попадания в градацию, %									Среднее, \bar{s}^*	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\bar{s}}^*$	$\sigma_{\sigma_{\bar{s}}}^*$	V, %	Число случаев
	-4,0... -6,0	-6,1... -8,0	-8,1... -10,0	-10,1... -12,0	-12,1... -14,0	-14,1... -16,0	-16,1... -18,0	-18,1... -20,0	-20,1... -22,0						
Зима	15,9	21,9	17,9	16,7	12,8	6,8	4,4	3,2	0,4	-9,9	-3,8	0,24	0,17	38,7	251
Холодное	18,0	21,8	18,0	16,4	12,8	5,2	4,2	3,1	0,5	-9,7	-3,8	0,19	0,14	39,3	384

