

**Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
(Росгидромет)**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»
(ФГБУ «ГГО»)**

На правах рукописи

Козлов Владимир Николаевич

Электрические методы искусственного регулирования осадков

**Специальность: 25.00.30-Метеорология, климатология,
агрометеорология**

**Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук**

**Научный консультант
доктор физико-математических наук
В.Н. Морозов**

Санкт-Петербург – 2013

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Лесные пожары и борьба с ними.....	12
1.1. Лесопожарная обстановка	12
1.2. Экологический и социальный ущерб от лесных пожаров.....	14
1.3. Классы пожарной опасности лесов.....	18
1.4. Альтернативные методы оценки пожарной опасности в лесу по условиям погоды	22
1.5. Экспериментальные работы по тушению лесных пожаров искусственно вызванными осадками.....	27
1.6. Синоптические процессы, благоприятствующие возникновению пожаров	38
1.7. Грозы как источник пожаров	41
1.8. Основные факторы, определяющие формирование ресурсной облачности	43
1.9. Ресурсная облачность в пожароопасный период года.....	46
1.10. Технические средства искусственного вызывания осадков на лесные территории	50
Выводы к Главе 1	57
Глава 2. Физические основы искусственного вызывания осадков водным аэрозолем	58
2.1. Опыты по использованию водного аэрозоля.....	58
2.2. Структура воды.....	61
2.3. Атмосферные ионы	66
2.4. Избирательные свойства поверхности воды.....	68
2.5. Электризация капель воды при разрушении	73
2.6. Влияние ионов на процессы конденсации	75
2.7. Механизм образования осадков в облаках.....	79
2.8. Эмпирическая модель конвективного облака.....	83
2.8.1. Образование конвективного облака	83
2.8.2. Рост капель в облаках.....	83
2.8.3. Стадия зрелого облака или стабилизации.....	88
2.8.4. Стадия диссипации.....	89
2.8.5. Электрическое состояние конвективных облаков	89
2.9. Физические основы засева облаков	91
2.10. Применения самолетов-танкеров для искусственного вызывания осадков водным аэрозолем.....	94
Выводы к Главе 2	107
Глава 3. Искусственное вызывание осадков растворами гигроскопических веществ	109
3.1. Опыты по модификации жидкокапельной фазы воды в паровоздушной среде гигроскопическими веществами	109
3.2. Расчетные формулы для конденсационного роста капли на гигроскопическом ядре	113
3.3. Расчетная формула для числа столкновений электрически заряженных капель	122
3.4. Укрупнение заряженных капель в результате электрической коагуляции	124
3.5. Искусственное вызывание осадков растворами гигроскопических веществ	130
Выводы к Главе 3	134
Глава 4. Обоснование электрических методов искусственного регулирования осадков ..	136
4.1. Физические основы электрических методов	136
4.2. Взаимодействие легких ионов с облачными частицами	141
4.3. Влияние заряженного аэрозоля на укрупнение капель	144
4.4. Коэффициент захвата капель заряженным аэрозолем в зависимости от их радиусов и зарядов.....	147
4.5. Результаты расчета роста радиуса заряженных капель, обусловленных их электрической коагуляцией.....	150

4.6. Лабораторные исследования процессов кристаллизации переохлажденных капель ионами	153
4.7. Кристаллизация переохлажденных облачных капель ионами.....	158
4.8. Влияние адсорбированных ионов на гомогенный механизм кристаллизации	162
4.9. Кристаллизация капель с адсорбированными ионами	165
4.10. Искусственная ионизация в облачной среде	168
4.11. Обоснование применения заряженных гигроскопических аэрозолей для искусственного вызывания осадков	170
Выводы к Главе 4	174
Глава 5. Термоионизационный метод генерации заряженных аэрозольных частиц.....	179
5.1. Пиротехнический способ генерации заряженных аэрозолей.....	179
5.2. Продолжительность сохранения температуры горячих частиц	189
5.3. Электроны эмиссии с образовавшихся горячих частиц	194
5.4. Реакции образования отрицательных ионов электронами эмиссии.....	198
5.5. Взаимодействие легких ионов с частицами – продуктами сгорания пиротехнического состава	200
5.6. Распространение в конвективном облаке частиц реагента	208
5.7. Основы технология воздействия на конвективные облака пиротехническими генераторами	210
5.8. Искусственное вызывание осадков на лесной пожар	214
5.9. Уточнение рубежа воздействия	222
5.10. Наведение искусственно вызванных осадков на лесной пожар	224
5.11. Использование заряженного аэрозоля для инициирования грозových разрядов	225
Выводы к Главе 5	231
Глава 6. Оценки ИВО и перспективные направления развития методов борьбы с лесными пожарами	233
6.1. Численные и натурные эксперименты по оценке ИВО	233
6.2. Физическая оценка эффективности ИВО для тушения лесных пожаров	237
6.3. Экономическая оценка эффективности ИВО для снижения КПО и тушения лесных пожаров.....	243
6.4. Возможности применения подвижных комплексов в системе пожаротушения.....	246
6.5. Применения беспилотных воздушных судов	250
6.6. Аэрологические наблюдения	252
6.7. Система измерения фактических метеорологических величин.....	254
6.8. Измерение осадков	258
6.9. Элементы технологии управления искусственным вызыванием осадков в системе пожаротушения.....	261
Выводы к Главе 6	263
Заключение.....	267
Список использованных источников.....	272
Приложение.....	302
2000 год	302
2001 год	302
2002 год	303
2003 год	303
2004 год	304
2005 год	305
2006 год	305
Акт внедрения.....	306
Заключение о результатах испытания реагента	307

Введение

Актуальность исследования обусловлена назревшей необходимостью эффективного решения проблемы управления атмосферными процессами. Поиск практического решения данной проблемы является одной из важнейших задач в современном мире в связи с увеличением количества явлений, приводящих к засухам, наводнениям, сильным ливневым осадкам и другим опасным природным явлениям. Разработка новых и совершенствование существующих способов и технических средств воздействия на атмосферные процессы с целью искусственного регулирования осадков, предотвращения гроз и града имеют исключительную значимость.

В результате проведенных теоретических исследований и экспериментальных работ в области активных воздействий (АВ) в нашей стране и за рубежом достигнуты определенные практические результаты в процессах искусственного регулирования осадков (ИРО). Разработанные методы и средства АВ внедрены в защите от градобитий и искусственном вызывании осадков (ИВО) для снижения класса пожарной опасности лесов и тушения лесных пожаров.

Лесные пожары являются одной из трудно решаемых проблем народного хозяйства. По статистическим данным лесные пожары уничтожают в год до 70 миллионов м³ древесины и до 700 тыс. гектаров лесных насаждений. Актуальность проведения исследований по борьбе с лесными пожарами определяется и тем, что в связи с потеплением климата в различных частях РФ засухи и лесные пожары случаются почти ежегодно, принося огромный экономический, экологический и социальный ущерб.

Пожары оказывают влияние на региональную погоду: при действии крупных пожаров или многих небольших пожаров в регионах формируются устойчивые области высокого давления, сопоставимые по масштабам с атмосферными барическими системами. Циклоны обходят эти участки стороной, формируя в местах пожаров еще более сухую и жаркую погоду.

Однако в достигнутых за последние десятилетия результатах ряд проблем в области АВ остается еще не решенными. В частности, до настоящего времени при АВ на облачные системы используются реагенты, разработанные в 40-х годах прошлого столетия. Наибольшее применение из них находят твердая углекислота (CO_2), йодистое серебро (AgI), гигроскопические вещества и грубодисперсные порошки, однако их применение не всегда является успешным. Многие вопросы физики облаков и осадков остаются неизученными, не применяются в производственных процессах электрические методы воздействия на облака и осадки, требуется разработка реагентов без температурного порога применения, особенно в теплый период года.

Цель настоящего исследования заключается в теоретической и экспериментальной разработке нового электрически заряженного аэрозоля (реагента) для АВ на теплые и водяные облака, новых технологий ИВО для снижения класса пожарной опасности лесов (КПО) и тушения лесных пожаров новым реагентом. Для достижения указанной цели в диссертационной работе решаются следующие частные задачи:

- 1) Пиротехнический способ генерации заряженных аэрозолей с гигроскопическими свойствами (реагентов) для ИВО из конвективной облачности.
- 2) Теоретическое исследование конденсационного роста, кристаллизации и укрупнения облачных частиц заряженным аэрозолем.
- 3) Разработка технологий ИВО самолетными методами с использованием баллоэлектрического эффекта при применении водного аэрозоля и заряженных растворов гигроскопических веществ.
- 4) Разработка технологии искусственного разряда конвективного облака.
- 5) Оценивание физической и экономической эффективности ИВО для тушения лесных пожаров заряженными аэрозолями.

- б) Разработка перспективных наземных и авиационных методов ИВО для снижения КПО и тушения лесных пожаров.

Методологической основой для исследования послужили теоретические и экспериментальные результаты работ по авиационной охране лесов ИВО, проводимые с 1966г. по 1991г. ГГО им А.И.Воейкова (Н.С. Шишкин, Ю.П. Сумин, Г.Д. Кудашкин и др.), ЛенНИИ леса (Е.С. Арцибашев), Краснодарским филиалом ГосНИИ ГА (Л.Г. Щедрина) и Центральной базой авиационной охраны лесов в последствии «Авиалесоохрана» (Н.А. Ковалев, Е.А. Щетинский и др.).

Теоретическая значимость и научная новизна работы состоит в следующем:

Впервые разработан экспериментальный реагент для ИВО на основе щелочных металлов, позволяющий проводить АВ на теплые облака в пожароопасный период года.

Впервые исследовано влияние заряженных аэрозолей с гигроскопическим (составом) на процессы конденсации, кристаллизации и осадкообразующий механизм в облаках (ИВО).

Разработана методика засева конвективной и слоистообразной облачности над лесными территориями с лесопатрульных самолетов.

Выработаны критерии пригодности мощной конвективной облачности для ИВО, дано определение электрической неустойчивости в облаках.

Впервые предложено использовать баллоэлектрический эффект для ИВО на лесные территории.

Впервые предложено использование наземных средств АВ и беспилотных воздушных судов для ИВО с целью снижения КПО и тушения лесных пожаров.

Новизна проведенного исследования заключается в использовании более эффективных реагентов для ИВО, зарекомендовавших себя в экспериментальных работах по тушению лесных пожаров в 1998-2006 гг. Для

ИВО предложено использовать модернизированные самолеты Ан-2п, новейшие противопожарные самолеты Ан-32п и Бе-200п, а также беспилотные воздушные суда.

Практическая значимость работы заключается в эффективности применения разработанных в рамках настоящей диссертационной работы технологий ИВО из конвективной облачности на лесные территории, которые успешно использовались для снижения КПО лесов и тушения лесных пожаров с 1993г. по настоящее время. Технологии позволяют определять пригодность облаков к засеву реагентами, рассчитывать количество искусственно вызванных осадков, наводить искусственно вызываемые осадки на очаг пожара, оценивать огнегасящий эффект после выпадения осадков.

Результаты исследования внедрены в нормативную руководящую документацию в виде инструкции « РД 52. 04.628-2001. Инструкция. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов »; руководящего документа «РД 52.04.674-2006 . Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от пожаров»; руководящего документа «РД 52. 11.679-2006. Методические указания. Комплексная оценка возможных вредных уровней воздействия на окружающую среду при работах по активным воздействиям на гидрометеорологические и геофизические процессы ».

Разработанные руководящие документы являются действующими и используются на базах авиационной охраны лесов от пожаров, в частности, в Дальневосточном, Сибирском, Уральском, Центральном и Северо–Западном округах.

Основные результаты и положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Разработанный термоионизационный способ генерации заряженных

аэрозолей для ИВО из конвективной облачности для снижения интенсивности засушливых явлений, КПО лесов и тушения лесных пожаров.

2. Предложенный ионогенный механизм осадкообразования в конвективной облачности, заключающийся в участии заряженных аэрозолей в процессе укрупнения облачных капель.

3. Разработанную технологию ИВО с применением баллоэлектрического эффекта с использованием легкообъемных и средневысотных воздушных судов.

4. Разработанный термоионизационный метод предотвращения молниевых разрядов заряженным аэрозодем.

5. Результаты реализации физической эффективности и экономического эффекта ИВО на примере охраны лесов от пожаров.

Личный вклад автора заключается:

Диссертационная работа является логическим завершением исследований, выполненных в ФГБУ ГГО по разработке новых реагентов и технологии их использования для ИВО и предотвращения грозовых разрядов при охране лесов от пожаров. Показана возможность и целесообразность использования результатов работ по созданию технических средств и руководящих документов, опубликованных в Гидрометеиздате, трудах ГГО им. А. И. Воейкова, для снижения КПО и тушения лесных пожаров ИВО.

В ходе исследования разработаны:

- действующие руководящие документы по ИВО для снижения класса пожарной опасности лесов и тушения лесных пожаров (РД 52.04.628-2001; РД 52.04.674-2006);
- реагент для АВ на конвективную облачность (патенты РФ: №№ 2090548; 2090549; 2179800; №2181239);
- способ и устройство для создания конвективной облачности (патенты РФ №№ 2045164; 2060640);
- способы и устройства для искусственного вызывания осадков (патенты РФ: №№ 2061358; 2073969; 2075284; 2191499);

- способ инициирования грозových разрядов (заявка на патент № 2013131639).

Проведено теоретическое обоснование применения заряженных аэрозолей для ИВО на лесные пожары. Осуществлено научно-методическое руководство работами, проводимыми ФГУ «Авиалесоохрана», по снижению класса пожарной опасности лесов и тушению лесных пожаров ИВО, обеспечившее получение потенциального экономического эффекта за 2000-2006гг в размере 3,3 млрд. долларов США.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы, выполнявшейся в течение 25 лет представлены на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, среди них:

The Fifteenth International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014), will be held in Norman, Oklahoma, USA, 14-19 June 2014.

Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь». – 28 окт.-01ноября 2013. – Геофизическая обсерватория «Борок» филиал ИФЗ РАН.

VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. – Санкт-Петербург. – 24-28 сент. 2012.

Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – 24-28 октября 2011г. – г. Нальчик.

Межведомственное совещание «Повышение производительности и эффективности использования лесов на осушенных землях». Санкт-Петербург, 2008;

Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященная 70-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР.// Нальчик, 28-29 сентября 2005 г;

XXIII Генеральная ассамблея международного союза по геодезии и геофизике, 2003г.- Москва(представление результатов тушения лесных пожаров ИВО);

Научно-практическая конференция «О мерах по совершенствованию борьбы с лесными и торфяными пожарами» в г. Вологда 28 ноября 2002г.;

Межведомственное совещание-семинар по решению лесопожарных проблем. Санкт-Петербург.-2002г.;

Научно-техническая конференция ВМО по модификации погоды в Таиланде - 1999г.

Всероссийская конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы - Нальчик, КБР.- 1997.

Юбилейная конференция «Состояние и перспективы развития технологии и технических средств воздействия на гидрометеорологические процессы». Чебоксары, 12-14 августа 1999 г.;

Международный симпозиум «Гидрометеорология: наука и практика, современность и перспективы»; Санкт-Петербург 12-14 ноября 1997г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из шести глав, введения, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 307 страниц. Список литературы содержит 289 наименований, из которых 30 на иностранном языке.

В первой главе рассмотрены вопросы мониторинга лесных пожаров, экологический и социальный ущерб от лесных пожаров, изложены последствия лесных пожаров; приведен исторический обзор результатов работ по ИВО для борьбы с лесными пожарами с использованием реагентов и технических средств воздействия на атмосферные процессы.

Во второй главе рассмотрены структура воды и водяных капель, приведена эмпирическая модель конвективного облака. Произведена оценка возможности воздействия на конвективную облачность, используя баллоэлектрический эффект.

Третья глава посвящена ИВО растворами заряженных гигроскопических веществ, в качестве реагента предлагается использовать морскую воду.

В четвертой главе излагается теоретическое описание последовательности физических процессов, протекающих в атмосфере под влиянием ионизации, происходящей в результате естественных процессов и искусственной термоионизации. Приводится обоснование электрических методов воздействия.

В пятой главе освещаются вопросы, связанные с искусственным генерированием в атмосфере заряженных аэрозолей с гигроскопическими составляющими (реагентов) для ИВО.

В шестой главе приводится оценка физической и экономической эффективности искусственного регулирования осадков, рассматриваются перспективные методы ИВО. Для проведения работ по пожаротушению предложен мобильный комплекс, оборудованный малогабаритной МРЛ, профайлером, автоматизированной метеостанцией, беспилотным летательным аппаратом для обнаружения очагов пожаров и ИВО, средствами связи, управления, наземными средствами ИВО и пожаротушения.

Предложенные технические решения направлены на использование ИВО для борьбы с лесными пожарами путем снижения КПО и ликвидации очагов лесных пожаров, а также предотвращения ущерба от засушливых погодных условий в других отраслях народного хозяйства.

Список использованных литературных источников состоит из 289 наименований, в приложении представлены результаты ИВО по авиабазам «Авиалесоохраны» РФ, акты испытаний и внедрения.

Глава 1. Лесные пожары и борьба с ними

1.1. Лесопожарная обстановка

Лесные пожары на всей планете являются стихийным бедствием, наносящим существенный ущерб народному хозяйству. Крупные лесные пожары возникают 1-3 раза в десятилетие. Особенно многочисленными они были в XX столетии: в 1901, 1908, 1910, 1912, 1915, 1921, 1932, 1934, 1936, 1938, 1955, 1958, 1966, 1972, 1975, 1976, 1984 гг.[29]. Катастрофические лесные пожары с десятками крупных очагов наблюдаются гораздо реже. Особенно высокая горимость лесов наблюдалась в 1915, 1921, 1972, 1976, 2010 гг.

Основными причинами возникновения лесных пожаров являются: деятельность человека, грозовые разряды, самовозгорание торфяной крошки и другие причины. В результате пожаров снижаются защитные, водоохранные и другие полезные свойства леса, уничтожается фауна, сооружения, а в отдельных случаях и населенные пункты. Кроме того, лесной пожар представляет серьезную опасность для людей и сельскохозяйственных животных.

Предотвращение лесных пожаров является приоритетным направлением лесоохраны, т.к. снижает риск возникновения и минимизирует затраты на тушение лесных пожаров. Не вызывает сомнения то, что пожар легче предотвратить, нежели потушить. Мониторинг лесных территорий включает определение класса пожароопасности лесов, проведение профилактических работ наземными службами, снижение класса пожарной опасности лесов искусственно вызванными осадками и др. мероприятия [35,161,252].

Существующие методики оценки лесопожарной обстановки [44] позволяют определить площадь и периметр зоны возможных пожаров в регионе (области, районе). Исходными данными являются значения лесопожарного коэффициента и время развития пожара. Значение

лесопожарного коэффициента зависит от природных и погодных условий региона и времени года.

Решение лесопожарной проблемы тесно связано с решением целого ряда организационных и технических задач. В первую очередь - это проведение противопожарных и профилактических работ, осуществляемых в плановом порядке и направленных на предупреждение возникновения, распространения и развития лесных пожаров, в том числе и искусственно вызванными осадками [116,121,122].

Как показывает опыт, в борьбе с лесными пожарами большое значение имеет фактор времени. От обнаружения лесного пожара до принятия решения по его ликвидации должно затрачиваться минимальное время. При этом важнейшей задачей является организация и подготовка сил и средств пожаротушения.

Обнаружение лесных пожаров в основном осуществляется космическими системами наблюдения, с наземных наблюдательных пунктов, а также при авиационном и наземном патрулировании лесов. Использование авиации для обнаружения лесных пожаров началось в 30-х гг., а космических средств в 60-70-х гг. XX столетия [8,30,228]. Для охраны лесов от пожаров в настоящее время используются специальные подразделения авиалесоохраны МЧС и местных региональных органов.

При тушении лесных пожаров применяются следующие авиационные и наземные методы:

- тушение горячей кромки сливом воды с самолета;
- искусственное вызывание осадков из облаков;
- применение химических веществ и других технических средств.

Работы по тушению пожаров можно разделить на следующие этапы: разведка пожара; локализация пожара, т.е. устранение возможностей нового распространения пожара; ликвидация пожара; дотушивание очагов горения; окарауливание пожарищ [252].

Разведка пожара включает в себя уточнение границ пожара и оценку ресурсной облачности. По результатам разведки прогнозируют возможное положение кромки пожара, ее характер и силу горения на требуемое время вперед, метеорологические условия, методы ликвидации пожара.

1.2. Экологический и социальный ущерб от лесных пожаров

Опасность лесных пожаров для людей связана не только с прямым действием огня, но и с большой вероятностью отравления из-за сильного обескислороживания атмосферного воздуха, резкого повышения концентрации угарного газа, окиси углерода и других вредных примесей. Поэтому основными мерами защиты населения от лесных пожаров являются:

- проведение профилактических мероприятий по предотвращению пожаров;
- тушение пожаров;
- обеспечение безопасного ведения работ по тушению пожаров.

По данным многолетней статистики, 90% пожаров вызвано человеческой деятельностью. Основная причина пожаров - нарушение правил пожарной безопасности в лесу и на прилегающих территориях. Другими причинами в условиях продолжительной засухи и высокой температуры воздуха служит самовозгорание лесной подстилки[163] в результате преломления солнечных лучей в осколках стекла или самовозгорание торфа под действием микроорганизмов в присутствии кислорода при влажности торфа ниже 40%; грозовые разряды над лесными территориями при прохождении фронтальных разделов.

Так, засуха 2010 года послужила причиной возникновения наиболее крупных лесных пожаров в истории России. В европейской части страны с середины июня 2010 г. более двух месяцев стояла аномальная жара и засуха, создавшая благоприятные условия для развития лесных пожаров. Всего с начала пожароопасного периода 2010 года в РФ произошло более 29 тысяч природных пожаров на общей площади 927,5 тысяч гектаров. В пожарах погибли более 50 человек, сгорели 2,5 тысячи домов. По данным Всемирного

центра мониторинга пожаров, площадь, пройденная пожарами на природных территориях РФ с начала 2010 г. по 13 августа составила не менее 10-12 миллионов гектаров [63]. Пожары затронули не менее 60 федеральных заповедников и национальных парков, уничтожив реликтовые леса и другие эталонные экосистемы, был нанесен непоправимый урон популяциям редких видов растений и животных.

По данным Рослесозащиты, с середины июня до начала августа 2010 г. были зарегистрированы лесные пожары на площади 3900 га земель, загрязненных радионуклидами, в т. ч. в Брянской (33 пожара на площади 269 га), Калужской (11 пожаров на площади 173 га), Тульской (6 пожаров на площади 44 га), Орловской (3 пожара на площади 13 га), Пензенской (34 пожара на площади 82 га), Челябинской (401 пожар на площади 1431 га) и Курганской области (12 пожаров на площади 63 га) [36].

В результате лесных и торфяных пожаров в РФ в 2010 г., по оценке гео-биоцентра Мюнхенского университета (Германия), в атмосферу планеты было выброшено от 30 до 100 млн. тонн двуокиси углерода [63]. Эмиссия CO₂ от лесных пожаров будет наблюдаться и в последующие годы за счет разложения поврежденной огнем, но не сгоревшей биомассы. По экспертным оценкам, общий выброс углекислоты от пожаров 2010 г. может составить 400 млн. тонн (эквивалентно 18% годовых антропогенных выбросов парниковых газов в России). Трудно определить стоимость основных экосистемных услуг, которые предоставляли сгоревшие леса (поглощение двуокиси углерода, выделение кислорода, защита почв и водоемов и др.[63]). В результате пожаров также ухудшается санитарное состояние выживших древостоев, увеличивается глубина промерзания почвы (в связи с ликвидацией лесной подстилки), усиливается поверхностный сток и водная эрозия на больших территориях, повышается вероятность наводнений при выпадении обильных осадков и быстром снеготаянии [141, 288].

Интенсивное задымление при пожарах 2010г. (иногда видимость не превышала 30-50 м) затронуло все регионы Центрального федерального

округа[274]. А, как известно, вещества, содержащиеся в дыме от торфяно-лесных пожаров, наносят ущерб здоровью населения. Так, по данным Минздравсоцразвития [63], в июле 2010г. число смертей по России в годовом исчислении выросло на 8,6% (в январе-июне смертность сокращалась). В некоторых из охваченных пожарами и/или задымлениями регионах смертность в июле 2010г. (по сравнению с июлем 2009г.) существенно возросла: в Москве — на 50,7%; в Ивановской обл. — на 18,3%; в Московской и Тульской обл. — на 17,3% ; в Республике Татарстан — на 16,6% ; в Рязанской обл. — на 13,5% ; Ульяновской обл. — 13% ; Тамбовской обл. — 11,1%; Липецкой обл. — 9% ; Республике Мордовия — 6,8%. При этом, в целом за период с января по июль 2010г. смертность в России снизилась на 0,3%. В ряде областей, где наблюдалась высокая температура, но отсутствовало интенсивное задымление, смертность в июле снижалась или увеличивалась незначительно (в Белгородской области +2,6%, в Кировской области +1,1%, в Воронежской области +0,7%, в Волгоградской области — 4,4%, в Ставропольском крае —3,6%). Это говорит о том, что увеличение смертности населения летом 2010г. было связано с пагубным воздействием задымления от многочисленных лесных пожаров.

По данным Департамента здравоохранения Правительства Москвы, на 9 августа 2010г. дополнительная ежедневная смертность от аномально-высокой температуры и задымления в Москве достигала 320-340 человек. Вызовы «скорой помощи» и число обращений к врачам увеличились на 20%. Общее число госпитализаций увеличилось на 10%, госпитализаций детей — на 17%. Основные причины обращений — сердечнососудистые патологии, бронхиальная астма, гипертоническая болезнь, проблемы с лёгкими. В больницах были запрещены плановые хирургические операции.

Подобная картина наблюдалась и в других областях, подвергшихся негативному воздействию лесных пожаров. Например, в г. Тольятти (Самарская обл.) в дни сильного задымления число вызовов скорой помощи в среднем увеличивалось в 1,5 раза (от 600-650 до 1060 в сутки) [63].

По данным ВОЗ [63], дым от природных пожаров вызывает раздражение глаз и дыхательных путей, бронхит, обострение астмы, снижает функции легких, что может стать причиной преждевременной смерти. Даже при краткосрочном пребывании в задымленной зоне природного пожара мелкодисперсные частицы (диаметром до 2,5 мкм), проникая глубоко в дыхательные пути, вызывают различные нарушения здоровья, обостряют хронические заболевания, повышают смертность. У здоровых людей твердые частицы вызывают расстройства функции легких и воспалительные изменения в легочной ткани, оказывают неблагоприятное влияние на иммунную систему. Окись углерода, поступая через легкие, препятствует транспорту кислорода к органам и тканям.

Группами риска при задымлении являются больные респираторными заболеваниями, болезнями сердечнососудистой системы, пожилые люди, дети, беременные женщины, курящие. Острые последствия задымления включают в т.ч. повышение смертности; рост числа острых респираторных заболеваний среди детей; рост числа госпитализаций в связи с сердечно-легочной патологией; рост числа обращений в отделения скорой медицинской помощи/амбулаторные учреждения. Хронические последствия включают: рост частоты случаев астмы и других респираторных заболеваний; снижение ожидаемой продолжительности жизни.

Наиболее подробные данные по влиянию длительного задымления от лесных пожаров на здоровье населения представлены по Хабаровскому краю [63]. Так, после четырех месяцев задымления в 1998г. в течение двух лет наблюдался устойчивый рост заболеваемости в Комсомольске-на-Амуре по многим классам болезней. Возвращение к допожарному уровню произошло лишь через четыре года. Во время начальной стадии задымления обнаружилось заметное снижение уровня Т-лимфоцитов у детей и беременных, позже — у пожилых и взрослых. У детей отмечен рост заболеваемости инфекционными и паразитарными болезнями, болезнями органов дыхания (в т.ч. аллергическим ринитом и бронхиальной астмой),

заболеваемости функциональными расстройствами желудка, гастритами и дуоденитами, болезнями системы кровообращения (особенно резко возросло количество случаев анемии). Среди подростков и взрослого населения в 1998-2002 гг. также отмечен рост заболеваемости после задымления 1998г., в том числе по болезням, по которым до этого наблюдалось снижение заболеваемости. После 1998г. стала расти смертность населения (к 2002 г. на 33,8%), которая до того снижалась. В 1998г. в крае, по сравнению с 1997г., резко (в 1,4-4 раза) возросло поступление на стационарное лечение больных с цереброваскулярной патологией.

1.3. Классы пожарной опасности лесов

Для принятия решения о проведении работ по искусственному вызыванию осадков необходимо знать состояние пожароопасности леса, фактическое состояние погоды в предполагаемом районе работ, а также возможность ее изменения в ближайшие сутки. Распознавание и прогнозирование лесных пожаров осуществляют на базе ГИС-технологий [200], разрабатываемых в ГМЦ РФ и уточняемых в ряде регионов с учетом местных особенностей. Для расчета класса пожарной опасности, как правило, используют шкалу проф. Нестерова [176, 177] и ее региональные варианты.

Опыты по изучению зависимости между метеорологическими условиями и горимостью леса были начаты в 1938г. Было показано, что прогнозирование возникновения лесных пожаров невозможно по одной метеорологической величине. Было выявлено, что на влажность горючих материалов влияют не только количество, но и продолжительность осадков, температура воздуха, относительная влажность, скорость высыхания (число дней, прошедшее после выпадения осадков) и ряд других факторов. Необходимо было разработать комплексный подход, наиболее полно учитывающий метеорологические факторы, влияющие на возникновение лесного пожара. В результате в 1942г. была разработана и принята в конце 40-х гг. шкала В. Г. Нестерова, состоящая из 5 КПО лесного почвенного покрова.

Показатель пожарной опасности определяется по состоянию условий погоды на 12-14 ч местного времени как сумма произведения температуры воздуха на разность температур воздуха и точки росы за число суток без дождя по выражению:

$$Г = \sum_{i=1}^n (t^o - \tau)_i t^o_i, \quad (1.1)$$

где G – индекс пожарной опасности лесов, $(t^o - \tau)_i$ – разность температуры воздуха и точки росы в полдень по местному времени, n – число суток после последнего дождя (2,6мм), при осадках 2,6 мм в течение суток G приравнивается нулю.

Основными погодными факторами, влияющими на распространение пожара, являются: ветер, влажность, осадки, температура воздуха и солнечная радиация.

Ветер способствует дополнительному притоку кислорода, переносу горящих предметов на расположенные по направлению ветра горючие материалы, что вызывает возникновение новых очагов пожара. Одновременно лесной пожар способствует возникновению конвективных воздушных потоков, усиливающих распространение пламени. Нагретый над очагом пожара воздух поднимается вверх. На его место устремляется менее нагретый воздух, богатый кислородом, который поддерживает процесс горения. Над крупным лесным пожаром образуется конвективная колонка, в которой горящие ветки, угли и другие предметы лесной растительности поднимаются вверх, а затем опускаются на удалении 200-300 м и более от пожара, создавая новые очаги возгорания.

В холмистой и пересеченной местности воздушные потоки днем обычно направлены вверх по ложбинам и склонам, а ночью меняют направление и движутся вниз.

Количество водяного пара, содержащегося в воздухе, характеризуется абсолютной и относительной влажностью (от 0 до 100%). Влажность горючих материалов, зависящая от относительной влажности воздуха,

является важным фактором, влияющим на ход тушения лесных пожаров. В течение дня, по мере того как солнце прогревает землю, и температура повышается, относительная влажность воздуха уменьшается, воздух становится суше. Ночью происходит обратный процесс, температура понижается, а относительная влажность стремится к 100%. Поэтому ночью процесс горения замедляется.

Температуру воздуха при тушении пожаров учитывают как один из основных факторов. Нагретый солнечной радиацией горючий материал высыхает быстрее, чем такой же материал при отсутствии солнечного излучения, что способствует более быстрому распространению огня.

Степень опасности возникновения и распространения пожаров в лесу (пожарная опасность) определяется:

- по лесорастительным условиям лесных участков (природная пожарная опасность);
- по условиям погоды в конкретном регионе (пожарная опасность по влажности лесных горючих материалов).

Пожарную опасность по лесорастительным условиям лесных участков определяют такие характеристики лесного фонда, как тип леса, структура насаждения, породный состав и возраст, категория лесных площадей, вырубок и проч. [44].

Пожарная опасность по условиям погоды обуславливает возможность горения лесных горючих материалов в зависимости от их влажности, определяемой погодными условиями.

При расчетах по формуле (1.1), по данным метеорологических наблюдений, за срок 12-14 ч местного времени в сухую погоду наблюдается непрерывное возрастание значений КПО. Расчет ведется до тех пор, пока количество выпавших осадков не составит 2,6 мм и более. При количестве осадков свыше 2,6 мм за сутки комплексный показатель пожарной опасности в лесу приравнивается к нулю [44].

Различают 5 классов пожарной опасности (таблица 1.1).

Во многих регионах разработаны и применяются местные шкалы пожарной опасности, учитывающие местные особенности горимости лесов и её зависимость от величины комплексного показателя.

Шкала классов пожарной опасности

Таблица 1.1

Класс пожарной опасности	Градации КПО	Пожарная опасность
I	0 - 300	Отсутствует
II	301 - 1000	Малая
III	1001 - 4000	Средняя
IV	4001 - 10000	Высокая
V	Более 10001	Чрезвычайная

При I классе пожарной опасности пожары, как правило, не возникают, хотя возможны пожары от молний при сухих грозах, возникшие ранее пожары прекращают действовать или распространяются медленно.

При II классе пожарной опасности пожары возникают от сильных источников огня, количество возгораний невелико. Скорость распространения огня незначительна.

При III классе пожарной опасности лесные пожары возникают от большинства источников огня. Пожары интенсивны, выделяют большое количество тепла, быстро распространяются и создают дополнительные мелкие очаги.

При IV классе пожарной опасности пожары возникают даже от незначительных источников огня, быстро распространяются и достигают крупных размеров.

При V классе пожарной опасности пожары возникают от любого источника огня и высоких температур. Горение интенсивное и очень быстро распространяется на большие площади.

Пространственно-временное распределение числа дней с высокой пожарной опасностью приведено в работе [46]. Наибольшее число дней в РФ с горимостью III-V классов наблюдается в Забайкалье (в среднем 21 день), наименьшее – на территории Дальнего Востока и Сахалина менее 8 дней [190-195]. На остальной территории РФ число дней с высокой

пожарной опасностью изменяется в среднем в пределах от 8 до 12 дней [185-189].

1.4. Альтернативные методы оценки пожарной опасности в лесу по условиям погоды

Практика применения показателя В.Г. Нестерова 1968г. и основанной на нем шкалы пожарной опасности лесов выявила ряд недостатков [44], основным из которых является отсутствие физического смысла в формуле (1.1). Предложенное В.Г. Нестеровым первоначально (1949г.) произведение температуры на дефицит влажности (d) с размерностью градус на миллибар имело физический смысл: с ростом (падением) температуры дефицит влажности увеличивается (уменьшается). Замена дефицита влажности на гигрометрическую разность (Δ -дефицит точки росы) привела к произведению градус на градус ($C^0C^0=C^2$), в результате чего произведение фактически утратило физический смысл. Представляется целесообразным заменить дефицит точки росы на дефицит насыщения (Δf). Тогда основой формулы (1.1) будет:

$$G'_j = T_j \Delta f_j, \quad \text{где } \Delta f_j = (100 - f_j), \quad (1.2)$$

f_j – относительная влажность (%) в местный полдень.

В показателе В.Г. Нестерова также не учитываются реальные процессы влагопереноса, происходящие в приземном слое атмосферы под влиянием солнечного излучения, турбулентности и других факторов, очень некорректно учитывается влияние осадков на пожарную опасность (сбрасывание КПО до нуля после осадков 2,6мм). Попытки усовершенствовать показатель В.Г. Нестерова предпринимались неоднократно. Действие турбулентного обмена, солнечного излучения, процессы испарения и конденсации вполне возможно учесть иначе, несколько усовершенствовав формулу (1.1).

Рассмотрим более подробно температурно-влажностные характеристики леса. Для леса характерны две деятельные поверхности или слоя: первый расположен в кронах деревьев, второй – на почве, на траве или

мху, покрывающем почву. Радиационные потоки в лесу формируются в результате взаимодействия радиационного режима кроны деревьев. Вследствие этого поверхность почвы в лесу прогревается меньше, чем на открытой местности. В среднем суточном ходе наибольшие разности температуры воздуха на открытой местности и в лесу наблюдаются во второй половине дня и составляют 2-3 градуса, а в отдельные сроки могут достигать $6,5^{\circ}\text{C}$ [53]. Такие случаи наблюдаются после продолжительных периодов отсутствия дождей, когда на открытой местности получает развитие турбулентный обмен, а под кронами деревьев возможность прогрева мала и в дневное время наблюдается на уровне наибольшей плотности листвы. Здесь же отмечаются максимумы абсолютной и относительной влажности, обусловленные поглощением радиации и транспирацией деревьев. На рис.1.1. приведены средние профили метеорологических величин, характерные для лесных массивов умеренных широт [53].

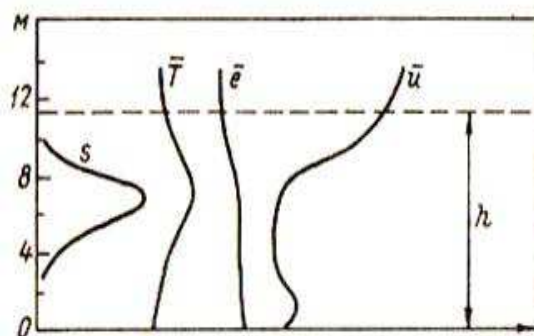


Рисунок 1.1. Средние часовые профили температуры (T), парциального давления водяного пара (e), и скорости ветра (u) в еловом лесу в районе Абердина (57° с.ш., 2° з.д.) в полдень солнечного дня в июле 1970г. (h – высота деревьев, s – распределение плотности кроны по высоте) [53].

Вследствие ослабленного обмена между лесной подстилкой, кронами и слоями атмосферы над кронами в лесу создаются благоприятные условия для повышенной влажности. Так как при сомкнутых кронах деревьев максимум температуры отмечается у поверхности кроны, то здесь же наблюдается и максимум абсолютной влажности, обусловленный транспирацией деревьев.

В связи с этим следует заметить, что высыхание лесных горючих материалов (ЛГМ) происходит в результате испарения влаги кронами деревьев.

Профили температуры и влажности воздуха в дневное время имеют максимумы на уровне наибольшей плотности листвы, где поглощение радиации и транспирация обуславливают максимальное количество тепла и влаги. Ниже этого слоя наблюдается инверсия, так как кроны деревьев теплее, чем лесная подстилка, на которую проникает меньшее количество радиации.

Скорость воздушного потока в летнее время резко уменьшается при проникновении в растительный покров до достижения максимальной плотности листвы. Ниже этого уровня скорость ветра ослабевает до нуля на уровне шероховатости z_0 . Исследования Ю.Л. Раунера показали, что в лесах уровень шероховатости изменяется в пределах 2,0 – 3,5 м [53]. Этот показатель меняется в течение года. Тормозящее влияние лесного массива на ветер прослеживается на подступах к лесу на расстоянии 2-4-кратной высоты деревьев. Часть воздушного потока проникает в лес, а преобладающая его часть вынуждена подниматься над лесом, вызывая резкий рост скорости ветра над кронами деревьев, способствуя переходу низового пожара в верховой.

Длительное превышение испарения над осадками, сопровождающееся высокой температурой и значительным уменьшением относительной влажности, является достаточным для того, чтобы запасы влаги были исчерпаны, а вероятность возникновения лесных пожаров увеличилась. Относительная влажность (f) - выраженное в процентах отношение фактической упругости водяного пара в атмосфере к упругости насыщающего водяного пара при той же температуре - является одной из основных характеристик влажности. Содержание водяного пара значительно меняется в зависимости от физико-географических условий местности, циркуляционных особенностей атмосферы, турбулентного обмена, времени года, подстилающей поверхности и других факторов. Следовательно,

относительная влажность представляет собой комплексный показатель атмосферы, сформировавшийся в результате адвекции, турбулентности, радиации, облачности, испарения и осадков.

Минимальные значения относительной влажности наблюдаются летом. Суточный ход относительной влажности является обратным по отношению к суточному ходу температуры воздуха. Суточный минимум f приходится на послеполуденные часы, а суточный максимум – на время около восхода солнца. В горах и в свободной атмосфере суточный ход относительной влажности параллелен суточному ходу температуры. Максимум наблюдается в дневные часы, когда увеличивается облачность.

Учитывая сказанное выше, определение погодного индекса пожарной опасности необходимо проводить с учетом относительной влажности. На рис.1.2. приведен суточный ход относительной влажности в июле. Плавный ход относительной влажности свидетельствует о влиянии турбулентности в приземном слое, приводящей к нивелированию относительной влажности в атмосфере.

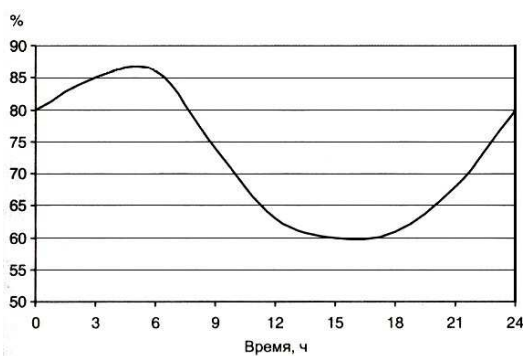


Рисунок 1.2. Суточный ход относительной влажности ($f, \%$) в июле в Санкт-Петербурге [82]

Для вычисления суточного индекса пожарной опасности предлагается формула (1.3).

$$\Gamma_c = \sum_{i=1}^n (T_j (f_{j-1} - f_j)) \quad (1.3)$$

где Γ_c – индекс пожарной опасности суточный; i – порядковый номер срока наблюдения ($n=8$), T_j , f_j – температура и относительная влажность в

срок наблюдения; j – срок наблюдения по местному времени (03, 06, 09, 12, 15, 18, 21, 24). В формуле (1.3) учитываются изменения относительной влажности, происходящие в течение суток. Как правило, при выпадении осадков нарушается суточный ход относительной влажности, представленный на рис. 1.2. Выражение в скобках учитывает эти изменения, что равносильно, с нашей точки зрения, автоматическому учету выпадающих осадков. При расчетах, если $f_{j-1} = f_j$, то необходимо рассчитывать по выражению $f_{j-2} - f_j$. В результате турбулентного обмена в атмосфере пятнистость осадков и их количество будут выражаться в формировании относительной влажности в определенном районе [135].

Следует отметить, что, если индекс Нестерова после дождя с количеством осадков 2,6 мм и более обнуляется искусственно, то индекс Γ_c становятся отрицательным. В соответствии с суточным ходом метеорологических величин формируется суточный цикл развития лесного пожара, определенный по экспериментальным данным [217,252]:

- максимальная интенсивность горения с 9 до 21 ч;
- снижение интенсивности с 21 ч до 4 ч;
- слабая интенсивность горения с 4 до 6 ч;
- увеличение интенсивности горения с 6 до 9 ч.

Почасовые индексы $\Gamma_{\text{ч}}$, определенные в срок наблюдения метеорологических величин (табл.1.2) позволяют оценить изменения интенсивности и уточнить вероятное время возникновения лесного пожара.

Таблица 1.2 Почасовые индексы $\Gamma_{\text{ч}}$ за 9 и 10 июля 2012г. в Санкт-Петербурге

Дата	Срок наблюдений, ч								
	03	06	09	12	15	18	21	24	
09.07	-145	106	219	214	236	307	-234	-110	593
10.07	-54	324	322	324	47	23	-229	-319	438

Слабый дождь 10 июля наблюдался на метеостанции с 06 до 09 час, индекс $\Gamma_{\text{ч}}$ с 12ч к 15ч уменьшился с 324 до 47, следовательно, увеличения интенсивности лесных пожаров, которые наблюдались в области, не

произошло, и они не получили развития. Отрицательные значения индекса в вечерние и ночные часы свидетельствуют о снижении интенсивности лесных пожаров в это время.

1.5. Экспериментальные работы по тушению лесных пожаров искусственно вызванными осадками

Первые опыты по искусственному вызыванию осадков из мощных кучевых облаков с целью тушения лесных пожаров были проведены в 1966-1969 гг. ЛенНИИЛХ совместно с ГГО им.А.И.Воейкова. В опытах принимали участие доктор с.-х.н. Е.С. Арцыбашев, П.А.Губин от ЛенНИИЛХ, А.П.Чуваев, В.М.Сороковик и др. от ГГО им. А.И.Воейкова [8, 214, 231]. Для воздействия на конвективные облака использовался йодистый свинец PbI_2 и йодистое серебро AgI при температуре облака не выше $-6^{\circ}C$. Выпадение осадков из конвективных облаков мощностью 2000-2500 мм наблюдалось через 8-12 мин. после их обработки. Из 15 опытов, проведенных в Ленинградской области, положительные результаты были получены в 12, причем в 8 опытах осадки наблюдались от 15 до 40 мин. на площади до 12 км².

Первые опыты выявили ряд задач, которые было необходимо решить для внедрения нового метода тушения лесных пожаров в практику. Не все разновидности облаков могут быть использованы для активного воздействия, и не всегда метеорологические условия соответствуют искусственному вызыванию осадков. Поэтому, основными задачами дальнейших исследований в этом направлении стали:

- анализ и прогноз ресурсной облачности для воздействия в пределах пожароопасного периода;

- проведение экспериментальных работ по искусственному вызыванию осадков с использованием различных реагентов для проведения профилактических работ по снижению класса пожарной опасности лесов и тушению лесных пожаров;

- разработка технологии тушения лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками из облаков;

- оценка физической и экономической эффективности искусственного вызывания осадков для тушения лесных пожаров и проведения профилактических работ.

В течение 1968-1969 гг. производилась опытная проверка метода тушения лесных пожаров искусственными осадками над территориями Сибири и Дальнего Востока. Исследования проводились в период с июня по июль на самолетах-зондировщиках и специально оборудованном для воздействий на облака самолете-метеолаборатории ИЛ-14 под руководством Ю.П.Сумина [231].

Сведения о пожарах поступали от оперативных отделений баз авиационной охраны лесов, над территорией которых проводились исследования. Вылет производился в том случае, если ожидалась ресурсная облачность для проведения воздействий в виде развития внутримассовой конвективной облачности или фронтальных разделов. Перед вылетом на АМСГ определялись направление и скорость переноса воздушных масс в слое развития конвекции по данным пунктов радиовеетрового зондирования атмосферы в районе работ или с помощью карт барической топографии 850, 700 и 500 мб. Направление переноса облаков и их скорость уточнялись в районе пожаров по смещению теней от облаков относительно земных ориентиров, одним из которых служил дымовой шлейф от пожара. Поскольку указанные способы определения переноса конвективных облаков весьма приблизительны, то за рубежи воздействия принималась зона 10-30-минутного переноса, определенного на уровне 700 мб изобарической поверхности. По мере подхода облаков, пригодных для вызывания искусственных осадков, к передней части намеченного сектора воздействий производилось введение в них реагента, что позволяло неоднократно вызывать осадки. Чтобы убедиться в правильности намеченного для воздействия района, после первой серии воздействий производилось

наблюдение за смещением зоны осадков от одного из облаков. После корректировки местоположения района воздействия при наличии благоприятных условий опыты по искусственному вызыванию осадков на пожары продолжались.

В большинстве опытов в качестве реагента использовался йодистый свинец в пиротехническом составе С-55. Введение реагента производилось путем выстреливания 26-мм пиропатрона в боковую часть облака. В отдельных случаях в качестве реагента использовалась порошкообразная сернистая медь. При воздействиях, если имелась возможность, измерялся диаметр горизонтального сечения средней части облака, с помощью которого затем определялся ориентировочный объем облака по формуле:

$$V = 0,25\pi D^2 \Delta H, \quad (1.4)$$

где D - диаметр средней части облака, ΔH - вертикальная мощность облака.

За два летних сезона было проведено 20 опытов, потушены пожары на площади около 12 тыс. га, в 9 опытах удалось добиться локализации пожаров, в 6 опытах осадки выпали за пределами пожаров. Одной из основных причин непопадания искусственных осадков на пожар являлось отсутствие в намеченной зоне воздействия достаточно развитых по вертикали *Cu cong*. В таких случаях воздействия велись на любые близко расположенные мощные кучевые облака с целью профилактического смачивания окружающих пожар районов.

Одновременно с опытными работами велись и теоретические исследования [10,221,223,224]. Были рассчитаны и испытаны в натуральных экспериментах нормы расхода реагента в зависимости от толщины облака, температуры облачного основания и уровня засева. Решение поставленной задачи проводилось с учетом направления и скорости переноса воздушных масс в слое активной конвекции. Была составлена схема засева с учетом времени действия реагента и скорости перемещения облаков, пригодных для

воздействия, которая позволяет добиться того, чтобы осадки выпадали не только на очаги пожаров, но и над прилегающими районами с целью предотвращения их распространения. Предварительные натурные и теоретические работы, включающие поиск методов краткосрочного прогноза мощных конвективных облаков, учета синоптической ситуации, сдвига ветра и климатологии облачности, пригодной для засева, разработка аппаратуры (ИК) для контроля и локализации области пожара, позволили приступить к оперативным работам по тушению лесных пожаров с 1970 г.

Минлесхозом в 1970г. при Центральной базе авиационной охраны лесов была создана специальная авиагруппа с четырьмя опытно-производственными авиазвеньями в Красноярском и Хабаровском крае, Иркутской области и Якутии. В состав звена входили экипаж самолета-зондировщика (ЛИ-2 или ИЛ-14), летчик-наблюдатель и бортаэролог. В 1970-1971 гг. этими звеньями путем искусственного вызывания осадков из мощных конвективных облаков был потушен 71 крупный лесной пожар на общей площади 120 тыс. га, искусственные осадки были вызваны на 136 пожаров. Большинство пожаров было потушено за 7-8 дней до выпадения естественных осадков, что позволило сократить срок действия пожаров и сохранить большую часть лесов от уничтожения огнем. Условный экономический эффект за счет сбереженной древесины и сохранения сырьевых баз лесозаготовительных предприятий за два сезона опытно-производственных работ составил 3,6 млн. руб. в ценах того времени [8].

С 1972 г. способ тушения лесных пожаров искусственно вызванными осадками был внедрен на территории Красноярского края, Якутии и Иркутской области, несколько позже на территории Забайкалья, Тюменской области и северных районов Европейской части России [183]. Для проведения работ была разработана и утверждена специальная инструкция [9].

В 1977-1980 гг. с применением самолетных аэрозольных генераторов (САГ) были выполнены эксперименты по воздействию на мощные

конвективные облака с самолета Ан-2 [59, 150]. В этот же период под руководством Н.С.Шишкина произведено обоснование целесообразности разработки пиротехнических самолетных генераторов кристаллизующих реагентов с целью инициирования осадков из конвективных облаков для тушения лесных пожаров с применением легкомоторных самолетов типа АН-2 [58, 247]. Для проведения работ началась разработка кассетного устройства и его летные испытания. Выполненные в 1978 г. опыты по воздействию на конвективные облака с применением САГ-2 полностью подтвердили высокую вероятность искусственного вызывания осадков из мощных конвективных облаков с переохлажденной вершиной. Результаты показали, что выбранный способ засева обеспечивает достаточно высокую вероятность стимулирования осадкообразования: 70-80% засеянных облаков через 16-20 мин. после введения реагента под облаком переходят в кучево-дождевые с выпадением осадков.

Однако эти исследования не дали убедительного ответа на важный вопрос о том, в какой мере полученный результат является следствием воздействия, а в какой мере - естественного процесса. Выполненная оценка эффективности воздействия путем сравнения статистических данных о повторяемости случаев выпадения осадков из облаков, подвергнутых воздействию, и из облаков, развивающихся естественно, показала, что засеянные облака переходят в дождевые более часто, чем незасеянные.

В конце 80-х годов научно-исследовательские и конструкторские разработки, начатые Н.С.Шишкиным, завершились созданием технического устройства (КУСАГ-П) и технологии применения самолета АН-2, оборудованного им, для искусственного вызывания осадков из мощных кучевых облаков над очагами пожаров [154]. В работах принимали участие Краснодарский филиал ГосНИИГА, ГГО им.А.И.Воейкова, ЛенНИИЛХ, производственное объединение «Авиалесоохрана», НИИПХ.

В период с 10 по 28 июля 1989 г. на территории Енисейского авиаотряда Красноярской базы авиационной охраны лесов от пожаров на

самолете АН-2 были произведены опытно-производственные работы по тушению лесных пожаров. За период проведения работ было подвергнуто воздействиям 14 облачных образований. В качестве объекта для воздействия выбирались мощные кучевые облака и облачные гряды с нижней границей 1100-1900 м. Вертикальная мощность облаков, подвергшихся воздействию, отмечалась от 2,2 до 4,8 км, причем при воздействии на облака мощностью менее 2,2 км осадки после введения реагента не наблюдались.

Горизонтальные размеры облаков колебались от 2 x 3 км до 4,5 x 5,0 км; протяженность гряд облаков - от 10 до 15 км. Воздействия проводились в соответствии с технологией [9,151], которая включала в себя: выбор облаков, пригодных для воздействия; выбор наземной мишени (очага пожара) и рубежа воздействия; проведение воздействий с целью искусственного вызывания осадков на очаг пожара. Воздействия осуществлялись под нижней границей облачности на расстоянии 100 м от нее, на скорости полета самолета 150-180 км/ч путем приведения в действие аэрозольных генераторов в зоне восходящего потока под облаком.

В результате воздействий в 5 случаях были вызваны осадки на очаги пожаров, в 4 случаях осадки прошли мимо очагов пожаров, в 3 случаях осадки не наблюдались и в 2 случаях искусственные осадки не удалось идентифицировать на фоне естественных, хотя и те и другие попали на очаги пожаров.

Проведенные работы показали, что применяемая технология искусственного вызывания осадков с легкомоторного самолета типа АН-2 достаточно эффективна, однако кассетное устройство (КУСАГ-П), устанавливаемое под плоскостями самолета, увеличивает расход горючего до 20%, что снижает продолжительность полета самолета.

Одновременно с этим в процессе работ выяснилось, что мощные кучевые облака мощностью 2,0-2,5 км зачастую располагаются в области положительных температур до нулевой изотермы. В связи с этим в начале 90-х годов начались разработки нового реагента [108, 109, 113, 117, 136,],

который бы имел преимущества прежних автономных генераторов, но был бы свободен от таких недостатков как температурный порог применения.

С 1991 г. тушение лесных пожаров производится по доработанной технологии с учетом облачных ресурсов [26, 27, 46, 116, 121, 122] и с применением как пиротехнических составов с йодистым серебром, так и с новым реагентом, получившим название ионогенный гигроскопический аэрозоль (ПВ-26 ФХС), изготавливаемый в макетах пиропатронов ПВ-26.

Разработанная в ФГБУ ГГО в настоящее время технология [105, 107, 118, 137, 138] по искусственному вызыванию осадков при борьбе с лесными пожарами с борта воздушных судов гражданской авиации соответствует современным требованиям авиационной охраны лесов. Технология позволяет производить производственные работы по оперативному увеличению осадков применительно к особенностям ее использования для нужд лесного хозяйства при тушении лесных и торфяных пожаров и проведению профилактических работ по снижению класса пожарной опасности лесов. Применение ионогенных гигроскопических реагентов [112, 114, 119, 120] позволило расширить температурный диапазон проведения работ по искусственному вызыванию осадков, так как появилась возможность проводить работы по искусственному вызыванию осадков из «теплых» облаков, т.е. из облаков, расположенных в диапазоне положительных температур.

В 1999-2000 гг. были проведены опытно-производственные работы по искусственному вызыванию осадков для тушения лесных пожаров с использованием лесопатрульной авиации в Ленинградской области и ряде регионов РФ. Основные результаты работ по искусственному вызыванию осадков в Ленинградской области были получены в июле - августе 1999 г.

11 июля имели место работы по активным воздействиям на гряды конвективной облачности в районе Кириши-Тихвин Ленинградской области. Высота нижней границы гряды составляла 800-1500 м, температура нижней границы +10°C, относительная влажность в подоблачном слое 80-85%. На

участке в 180 км (туда и обратно) было отстреляно 61 изделие ПВ-26 ФХС с интервалом 20 сек. В результате проведенного воздействия прошли ливневые осадки восточнее-северо-восточнее г.Тихвина.

18 июля АВ на конвективную облачность проводились на маршруте Любань-Луга-Волосово. В результате засева облаков ливневые осадки прошли в районе п.Вырица, п.Сиверский, р-на аэропорта «Никольское».

25 июля на участке Луга-Волосово была обработана гряда конвективных облаков с нижней границей $H_n \sim 1200$ м и мощностью облаков 3,5-4,0 км. Было израсходовано 35 зарядов. В результате воздействия были вызваны интенсивные ливневые осадки с порывами ветра.

5 августа на участке Волосово-Луга была проведена обработка гряды облаков с $H_n \sim 700-800$ м и температурой $+20^\circ\text{C}$. Также был проведен отстрел 20 патронов с интервалом 1 мин. Воздействие было начато в 17.15 и окончено в 17.30, в 17.42 начали выпадать интенсивные ливневые осадки в районе п. Мшинская с прямым накрытием очага пожара восточнее п. Мшинская. В 17.46 наблюдения пришлось прекратить из-за начала прямых молниевых разрядов облако-земля.

7 и 8 августа вылеты проводились с аэродрома г. Тихвин. 7 августа над Тихвинским районом проходил атмосферный фронт в южном направлении с осадками малой интенсивности. В результате проведенных воздействий удалось интенсифицировать выпадение осадков. 8 августа в 12.00 час были проведены воздействия восточнее-юго-восточнее г. Тихвина на отдельные недождящие кучевые облака. Мощность облаков составляла ~ 1000 м, относительная влажность в подоблачном слое $\sim 90\%$, нижняя граница в момент первого воздействия 700-1000 м, при повторном воздействии 1200-2000 м с мощностью 2000-2500 м. В результате образовалось мощное кучево-дождевое облако с последующим выпадением интенсивных осадков юго-восточнее г. Тихвина.

Результаты использования новых реагентов для искусственного вызывания осадков из мощных кучевых облаков на авиабазах в зонах

ответственности ЦБ “Авиалесоохрана” приведены в Приложении. В 2000 г. было проведено 210 воздействий, включая профилактические, в том числе 127 пиропатронами ПВ-26 с 2% составом йодистого серебра и 83 пиропатронами ПВ-26 ФХС, генерирующими ионогенный гигроскопический аэрозоль. При каждом АВ в среднем было израсходовано 1-2 пиропатрона. АВ имели место при 104 лесных пожарах, общая площадь которых составила 24635 га. Осадки выпали на 44 пожара общей площадью 18079 га, что составляет 73,4% от площади всех пожаров. Пиропатроны ПВ-26 применяли три авиабазы (Сыктывкарская - 205 штук, Читинская - 78 штук и Амурская - 14 штук), количество неудачных засевов этими изделиями (осадки отсутствовали) - 53,0% (по авиабазам Сыктывкарская - 55,7%, Читинская - 8,2%, Амурская - 20%). На остальных авиабазах засев проводился пиропатронами ПВ-26 ФХС. Количество неудачных засевов составило 18% (по авиабазам: Иркутская, Красноярская, Томская, Ханты-Мансийская - 0%; Читинская - 65,4%, Якутская - 15,4%) [122].

При отсутствии ресурсной облачности для тушения лесных пожаров используются самолеты-танкеры. Например, в пожароопасный сезон 2001 г. авиабазам охраны лесов было установлено задание по тушению пожаров с воздуха с использованием 21 ВСУ-5 (ВСУ-5А) на вертолетах типа Ми-8 (Ми-8МТ), 15 самолетов-танкеров Ан-2п и трех самолетов-амфибий Бе-12п. В подготовительный период были проведены мероприятия, необходимые для применения вышеуказанных авиасредств. Были проведены тренировки экипажей самолетов-танкеров, подготовлены к работе имеющиеся в авиабазах водосливные устройства. Иркутской авиабазой был заключен договор с Таганрогским авиационно-техническим комплексом им.Г.М.Бериева на тушение лесных пожаров с воздуха самолетами Бе-12п [114].

Фактически за пожароопасный сезон 2001г. при тушении лесных пожаров было применено 24 ВСУ, произведено 358 сливов – 700 тонн воды на 70 лесных пожаров. С воздуха локализовано более 36 тыс. метров кромки

лесных пожаров. На Северо-Западной авиабазе для повышения эффективности ВСУ-5 была разработана и успешно испытана СПС-1 – система подачи смачивателя в полете в заполненное водой ВСУ-5.

В период с 22 мая по 28 сентября 2001г. на Иркутской авиабазе производились полеты на двух самолетах-амфибиях Бе-12п. Самолеты использовались на тушении 7 лесных пожаров. Был совершен 81 слив – 486 тонн воды на пожары площадью от 1,5 до 160,0 га. При этом ликвидирован один пожар на площади 10 га, локализовано 2 пожара – 0,5 и 70 га, а на остальных обрабатывались кромки. Общая протяженность смоченной полосы составила около 6000 м. Общий налет составил 108 час, из них непосредственно на тушение пожаров – 41 час.

В течение пожароопасного сезона 2001г. также применялся метод борьбы с лесными пожарами с помощью искусственного вызывания осадков. На базе Енисейского отряда лесной авиации был проведен семинар с привлечением ведущих специалистов ГГО им. А.И. Воейкова (г. Санкт-Петербург) и командно-летного состава авиабаз на тему «Тушение пожаров методом искусственного вызывания осадков». В течение сезона было произведено 59 воздействий, на 16 лесных пожаров попали осадки и на 8 из них оказали существенное влияние для их тушения. Все воздействия производились пиропатронами ПВ-26 ФХС, которые дают положительные результаты, как при отрицательных, так и положительных температурах конвективной облачности. Но в целом применение данного метода было значительно ниже уровня 2000 года (210 воздействий на 104 пожара), что можно объяснить задержкой с поставкой в авиабазы пиропатронов (поставлены в июле-августе), а также более благоприятной пожарной обстановкой (отсутствие пожаров) в середине сезона на авиабазах Сибири и Дальнего Востока. Результаты работ были представлены на XXIII Генеральной ассамблеи союза по геодезии и геофизике [264].

Дальнейшим направлением работ по охране лесов от пожаров, с нашей точки зрения, является разработка технологии искусственного вызывания

осадков с самолетов, танкеров, оборудованных устройствами для засева ресурсной облачности пиротехническими средствами[115], а также водометными устройствами воздействия непосредственно на очаги пожаров и для засева облачности водным аэрозолем [136, 137].

Технология активного воздействия на облака с лесопатрульных самолетов является наиболее экономически эффективной для предотвращения лесных пожаров при наличии ресурсной облачности, так как она совмещается с авиационным патрулированием лесных массивов и не требует значительных финансовых затрат. Тем не менее, она имеет некоторые ограничения, одним из которых является необходимость проведения полетов в непосредственной близости от основания конвективного облака, что требует от экипажа самолета предельной внимательности и осторожности, слаженности действий летчиков и борт-операторов.

Одной из важнейших задач совершенствования способа тушения лесных пожаров искусственно вызванными осадками является разработка методики прогнозирования конвективной облачности над пожароопасными участками [24, 48, 49]. Другой задачей является настоятельная необходимость в разработке такого способа воздействия, при котором, используя благоприятную метеорологическую обстановку в районе пожаров, можно было бы вызывать осадки до полной ликвидации пожара.

Для практики тушения лесных пожаров искусственными осадками важно установить те критерии, которые определяют вероятность выпадения осадков после засева облака реагентом. Как показали исследования, одним из таких критериев является вертикальная мощность облака[151]. Было установлено, что чем больше вертикальная мощность облака, тем вероятнее успех вызывания осадков и их интенсивность. При $\Delta H \sim 1700-2000$ м осадки бывают слабые и непродолжительные. При воздействии на облака с $\Delta H = 2500-3500$ м в 20% выпадают ливневые осадки, в 55% - умеренные, в остальных случаях - слабые. Облака с $\Delta H > 3500$ м дают при засеве, как

правило, ливневые осадки [69, 220, 222]. По продолжительности искусственные осадки резко отличаются: от нескольких минут (очень сильный ливневый дождь) до нескольких часов (умеренные осадки на большой площади) [37, 142, 152, 153].

1.6. Синоптические процессы, благоприятствующие возникновению пожаров

В России изучение влияния атмосферных процессов на возникновение лесных пожаров было начато Г..Я. Вангенгеймом [30], который предложил прогнозировать возникновение и развитие лесных пожаров по пяти типам погодных условий и ввел 17-балльную шкалу для оценки пожарной опасности погоды для леса. Более поздние исследования подтвердили тесную связь пожарной опасности в лесу с антициклоническим характером погоды [29, 161, 182].

Наиболее значимые пожароопасные ситуации возникают при прохождении холодных фронтов, вызывающих сильные ветры. Э.Н.Валендик [29] выявил наиболее типичные синоптические положения, при которых наблюдалось быстрое распространение пожаров до крупных размеров. Усиление пожарной опасности лесов связано с нисходящими движениями воздуха на большой площади (антициклональный характер погоды), сопровождающимися быстрым повышением температуры и уменьшением относительной влажности. Не менее сложная пожароопасная обстановка создается в теплых секторах циклонов, сменяющих антициклоны. В непродолжительный период смены барических образований пожары развиваются и распространяются значительно быстро. Этому способствует смена термической стратификации атмосферы с устойчивой на неустойчивую, развитие конвекции в атмосфере, увеличение высоты подъема конвективной колонки, усиление ветра в основании конвективной колонки и, как следствие, интенсивности пожара. Площадь пожаров при таких синоптических ситуациях за 2-3 дня может увеличиваться в десятки раз, а пожары становятся стихийным бедствием.

В Сибири и на Дальнем Востоке большинство лесных пожаров возникает в малоградиентных барических полях, в которых не наблюдаются сильные ветры, но характерны высокие температуры и низкая относительная влажность для пониженного давления, а для повышенного давления - прохождение холодных фронтальных разделов с грозами, сопровождающимися порывистыми ветрами и незначительными осадками.

Синоптические положения, при которых создается наивысшая пожарная опасность и наблюдаются лесные пожары, развивающиеся до крупных размеров, можно подразделить на четыре типа:

- обширный антициклон с прохождением по его периферии теплого фронта;
- глубокий циклон с фронтом окклюзии в теплом секторе;
- прохождение теплых фронтов при малоградиентных барических полях пониженного давления;
- прохождение холодных фронтов при малоградиентных полях повышенного давления.

Предвестниками крупных пожаров считаются некоторые типичные черты погоды, предшествующие пожароопасному периоду: сухая осень предшествующего года, малоснежная и холодная зима, ранняя и холодная весна [29, 35].

Сведения о лесных пожарах указывают на то, что грозы являются одной из причин возникновения лесных пожаров. Географическое распределение гроз над сушей определяется характером температурно-влажностного режима, циркуляцией атмосферы и рельефом местности [210]. Грозы разделяют на внутримассовые и фронтальные.

Внутримассовые грозы образуются над континентами в теплый период года в размытых барических полях, слабо выраженных и заполняющихся циклонах. Важнейшим условием образования внутримассовой грозы является развитие термической конвекции.

Фронтальные грозы формируются на атмосферных фронтах в процессе бурного вытеснения теплого воздуха вверх в результате натекающего вала холодных воздушных масс (атмосферный фронт по типу холодного) или восходящего скольжения теплого воздуха по фронтальной поверхности (атмосферный фронт по типу теплого).

Анализ повторяемости числа дней с грозами показал, что существуют очаги повышенной грозовой активности и зоны малого числа дней с грозой [191, 192]. С орографическими особенностями Иркутской области связано распределение числа дней с грозой на ее территории, где наблюдаются очаги грозовой активности от 7-8 дней с грозой в год до 35-36 дней. В Красноярском крае и Тыве число дней с грозой колеблется от 35 на юге Тувы до 0,9 на крайнем севере Красноярского края. Годовое число дней с грозой на территории Якутии колеблется в широких пределах: от 0,1 на крайнем севере республики до 20 в ее южных горных районах. В Забайкалье число дней с грозой в год изменяется от 12-13 до 32-38 в разных районах.

Грозовая деятельность усиливается с приближением к горным районам. Высокая грозовая активность отмечается на Алтае и юге Восточной Сибири.

Для принятия решения по ИВО анализируют синоптическое положение, данные температурно-влажностного радиозондирования, распределение ветра по высотам, наличие положительной энергии неустойчивости в атмосфере, уровень конденсации (вероятную нижнюю границу облаков) и уровень свободной конвекции (вероятную верхнюю границу облаков), а также знакомятся с прогнозом развития конвективной облачности. При отсутствии этих данных по картам барической топографии (АТ850, АТ700 и АТ500) в районе работ определяют скорость перемещения облаков (как правило, она равна 0,8 скорости ветра на АТ700) [116, 121].

К районам проведения работ по ИВО относятся территории лесного фонда, на которых своевременная ликвидация лесных пожаров не может

быть обеспечена существующими наземными силами и средствами пожаротушения [76,77].

ИВО в профилактических целях при отсутствии лесных пожаров проводят для снижения класса пожарной опасности, когда расчетная мощность облаков по прогнозу оказывается более 2-2,5 км.

Наиболее благоприятные условия для проведения работ по ИВО наблюдаются, когда нижние слои воздуха имеют значительную влажность (более 60 %), ветры слабые или полностью отсутствуют, местами были дожди конвективного происхождения, над районом работ по высотам наблюдаются градиенты температуры больше влажноадиабатических.

ИВО над районом работ для тушения очагов лесных пожаров целесообразно проводить в следующих синоптических ситуациях: область пониженного давления (малоградиентное барическое поле), приближение фронтальных разделов, ложбина, слабовыраженные фронтальные разделы типа вторичных холодных фронтов или фронтов окклюзий [116, 154].

ИВО проводить нецелесообразно, если в районе работ наблюдается усиливающийся антициклон (давление у земли растет), энергия неустойчивости отрицательная, на высотах наблюдается конвергенция ветра, градиенты температуры в нижней тропосфере меньше влажноадиабатических [116, 121].

1.7. Грозы как источник пожаров

В горимости лесов России грозы играют немаловажную роль. По многолетним данным «Авиалесоохраны» количество лесных пожаров от гроз колеблется от 6% до 20% от всех лесных пожаров. В отдельные годы в лесах Западной Сибири от молний возникало 70-80 %, а в лесах севера ЕЧ РФ до 40-60% всех пожаров. Наиболее часто пожары от гроз возникают на территориях Томской и Тюменской областей, Алтайского края, в Приагарье и Забайкалье, Якутии и др. регионах Дальнего Востока[78, 236].

Особенностью лесных пожаров, возникших от гроз, является одновременное их возникновение во многих местах. Связь возникновения лесных пожаров с периодичностью гроз отмечал Г.Я. Вангенгейм [30] и др. исследователи. Синхронность указанных явлений обычно прослеживается в период засух, когда устанавливается высокая пожарная опасность с КПО 3-5 классов. Выпадающие при грозах осадки неравномерны по площади и незначительны по величине и в большинстве случаев они не снижают степень пожарной опасности в лесу.

Грозы наблюдаются в основном при 3 КПО. Анализ возникновения лесных пожаров от гроз показывает, что их возникновение связано с прохождением вблизи очагов пожаров холодных фронтов при значительном прогреве приземного слоя воздуха и наличии холодного воздуха на высотах. Следует подчеркнуть, что возникновение лесных пожаров чаще всего наблюдается при сухих грозах. Этому, как правило, предшествует сухая погода, наблюдаемая при высоких метеорологических комплексах, определяющих КПО. Термодинамические условия для развития конвекции сохраняются, а израсходованные влагозапасы воздушной массы не восполняются в количестве достаточном для образования осадков.

Рассмотрим подробнее, каким образом могут образовываться сухие грозы. Вначале вода испаряется с поверхности земли: с кустарников, деревьев, полей, озер, рек и т.д. Большая часть испаряющейся воды приходится на растения. Вместе с испаряемой влагой в атмосферу поступает большое количество отрицательных ионов. Молекула воды обладает ярко выраженной электрической полярностью и, поэтому, легко присоединяет к себе отрицательные ионы, которые находятся на поверхности земли в избытке. Испаряясь, молекула воды уносит с собой захваченный ею отрицательный заряд [60, 230].

Данные электростатики свидетельствуют о том, что заряды концентрируются на разного рода ребрах и остриях заряженных тел. Земля как раз является таким заряженным телом. На земной поверхности находится

большое количество ребер и острых объектов – трава, злаки, листья кустарников и деревьев, особенно иголки хвойных растений. Именно они и испаряют большую часть воды из растений, которая вместе с отрицательными зарядами попадает в атмосферу. Согласно измерениям, объемная плотность отрицательных зарядов в приземном слое атмосферы может достигать 10^{-6} Кл/м³ [155, 172]. Конвективными движениями отрицательные заряды переносятся в верхние слои атмосферы, где образуется облачность, в которой происходит разделение электрических зарядов. Между сформировавшимися объемными зарядами при достижении критической напряженности и земной поверхностью происходят молниевые разряды. Возможности искусственного разряда конвективной облачности рассмотрены в пп 5.11.

1.8. Основные факторы, определяющие формирование ресурсной облачности

Пространственное распределение облачности, ее вертикальная протяженность, суточный и сезонный ход, а также другие характеристики обуславливаются взаимодействием ряда факторов, основными из которых являются - характер циркуляционных процессов и свойства подстилающей поверхности.

В результате циркуляционных процессов формируются воздушные потоки, переносящие водяной пар на большие расстояния по горизонтали, и крупномасштабные вертикальные движения, приводящие к вертикальному подъему влаги во всей толще тропосферы. Следствием этих процессов являются процессы облакообразования и осадкообразования, обеспечивающие влагооборот воды в системе Земля-атмосфера.

На территории РФ, согласно [30, 170, 149, 182], по преобладающему горизонтальному переносу воздушных масс выделяют три крупные климатические области: атлантическую, арктическую, тихоокеанскую. Последние в свою очередь подразделяются на более мелкие климатические

районы и подрайоны, которые существенно различаются по режиму облачности и осадков.

Область атлантического переноса распространяется на европейскую часть РФ и Западную Сибирь. Европейская часть РФ относится к атлантико-континентальным и континентальным районам. Летом в этих районах на фронтах развивается циклоническая деятельность, которая обуславливает развитие облаков и частое выпадение осадков. В эти районы проникает и тропический воздух, влага которого служит существенным дополнением к осадкам атлантических циклонов. Однако это влияние не распространяется на юго-восточные районы Европейской части РФ, для которых характерны засухи и суховеи.

На территории Западной Сибири также можно выделить несколько районов с различным режимом облачности и осадков, но в отличие от Европейской части климатические изменения с запада на восток в этой области происходят медленнее. Последнее обусловлено тем, что Западная Сибирь находится под влиянием не только Атлантики, но и обширного Азиатского континента.

Область арктического переноса распространяется на территорию Восточной Сибири. Для нее характерны вторжения арктических воздушных масс, которые затем трансформируются и приобретают свойства континентальной воздушной массы. Сюда не проникает ни атлантический, ни тихоокеанский воздух.

Область тихоокеанского переноса распространяется на территорию Дальнего Востока. Однако циркуляционные процессы, развивающиеся над Тихим океаном, не имеют тенденции к продвижению на запад, вглубь континента, т.к. этому препятствуют горы. Поэтому, на Дальнем Востоке основная роль в формировании климата и, следовательно, режима облачности и осадков принадлежит циркуляционным процессам. Сезонная смена океанических масс обуславливает сухую зиму и дождливое лето.

Наряду с общей циркуляцией, весьма важным климатическим фактором является рельеф. Хотя он и относится к факторам местного значения, но нередко играет решающую роль в формировании пространственно-временного распределения облаков. Масштабы воздействия рельефа на климат зависят от высоты и протяженности горной системы. Все горные хребты обостряют циклоническую деятельность и увеличивают облачность. Различия в формах рельефа обуславливают более сложное и разнообразное распределение всех метеорологических величин. Так, над возвышенностями повторяемость конвективной облачности больше, чем над долинами и котловинами. Имеются различия в суточном и годовом ходе облаков для станций, расположенных в долинах и предгорьях. Наличие окраинных морей и крупных водоемов в теплый период приводит к ослаблению конвекции и, следовательно, к уменьшению повторяемости конвективных облаков.

Области существенно различаются не только по характеру циркуляционных процессов, но и по свойствам подстилающей поверхности. Так, основную часть территории Западной Сибири занимает Западно-Сибирская равнина, и только с юго-востока она окаймлена горами, Восточная Сибирь представляет собой горную страну. Территория Дальнего Востока также может быть охарактеризована как горная страна, на которой равнины располагаются только в межгорных впадинах, вдоль морских побережий и долин крупных рек.

Возникновение лесных пожаров происходит весной после схода снежного покрова. В Сибири и на Дальнем Востоке различают два типа пожароопасных сезонов: продолжительный непрерывный, когда горимость сохраняется 5-7 месяцев; и короткий непрерывный с максимумом в летние месяцы. Первый сезон характерен для южной тайги, второй для средней и северной тайги. Одним из показателей возникновения крупных лесных пожаров (для Сибири площадь пожара 200га и более, для ЕЧ РФ - 25га и более) считают число дней без осадков по сезонам: весна, лето, осень. В

весенний пожароопасный период крупные пожары возникают при 10-20-дневном засушливом периоде, в летний период – при 20-30-дневной засухе, в осенний период при 20-40- дневном отсутствии осадков. Максимум крупных пожаров возникает весной после 30-40 дневного, летом и осенью после 40-50 дневного периода без осадков[29,35]. Окончание пожароопасного сезона приходится на конец осени, когда устанавливается устойчивый снежный покров.

Очевидно, что перечисленные факторы – циркуляция атмосферы и характер подстилающей поверхности, взаимодействуя, создают весьма сложную картину географического распределения кучево-дождевых облаков как по территории, так и от года к году и внутри пожароопасного сезона. В связи с этим целесообразно рассматривать закономерности распределения кучево-дождевых облаков и связанных с ними опасных природных явлений [184] по крупным физико-географическим областям, таким как Европейская часть РФ, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток.

1.9. Ресурсная облачность в пожароопасный период года

Изучение климатических ресурсов облаков, пригодных для АВ, позволяет сформулировать выводы о возможностях искусственного регулирования осадков в конкретном районе. Наиболее эффективными для АВ оказываются слоисто-дождевые (Ns), мощные кучевые (Cu cong) и кучево-дождевые (Cb) облака. Под облачными ресурсами для ИВО над пожароопасными районами принимается среднее месячное содержание водных запасов конвективных облаков в теплый период года.

Получение сведений о ресурсах облаков сопряжено с известными трудностями. Во-первых, для получения надежных значений характеристик облаков требуются длинные ряды наблюдений. Во-вторых, условие пригодности для воздействий предполагает знание критериев пригодности, а они, как правило, могут быть установлены лишь в эксперименте.

Изучение ресурсов облаков обычно выполняется в виде следующих этапов. На начальной стадии эксперимента на основании исследования

физических свойств облаков и проведения отдельных опытов по засеву устанавливаются критерии пригодности облаков в первом приближении. При этом используются сведения, полученные в других аналогичных экспериментах [13, 50, 51, 52, 57, 59, 71].

Затем в процессе самих воздействий или путем специальных системных исследований с помощью самолетных, радиолокационных и других средств определяется повторяемость облаков, пригодных для АВ.

После получения в результате эксперимента критериев пригодности облаков во втором приближении производится корректировка данных об облачных ресурсах района.

При проведении исследований ресурсов облаков в качестве критериев пригодности использовались следующие показатели: абсолютное количество, балльность и продолжительность существования облаков; повторяемость облачных систем, имеющих пригодные для воздействия облака; водозапасы облаков; повторяемость ситуаций, благоприятных для воздействия по данным натуральных экспериментов или численного моделирования; количество осадков [69].

Абсолютное количество облаков, пригодных для АВ, отнесенное к единицам площади и времени, является одним из наиболее совершенных показателей климатического ресурса. Косвенными показателями ресурсов могут служить балльность, продолжительность и другие связанные с ними характеристики облаков.

В атлантической климатической зоне выделяются несколько регионов с различными значениями ресурсной облачности: северо-западный регион, лесистые районы Европейской части РФ и Западно – Сибирская низменность. Проведенный анализ данных 8-срочных наблюдений за 10-летний период на 57 станциях северо-запада ЕЧ РФ позволил оценить облачные ресурсы, пригодные для ИВО [24, 189, 207, 208, 209]. Наиболее благоприятными районами для осуществления воздействий являются наветренные склоны и центральные части возвышенности, где число дней с ресурсной облачностью

наибольшее. На северо-западе в среднем за пожароопасный сезон (май - сентябрь) оно составляет 18-22 дня, а в отдельные годы достигает 28 дней в месяц. Число дней с ресурсной облачностью и высокой пожарной опасностью по территории Западной Сибири изменяется с 5-12 до 20-23 в месяц [195].

Среднее число дней с ресурсной облачностью в Восточной Сибири изменяется в широких пределах от 6 до 27 дней в Иркутской области [192], от 9 до 23 в Читинской и так далее и наблюдается на возвышенных формах рельефа. Наибольшее число дней для лесистых районов наблюдается в июле, на севере Иркутской области – в мае, а в северных и северо-восточных районах Забайкалья в июле и августе [191].

В тихоокеанской области для Хабаровского края вычислена вероятность появления конвективной облачности и высокой горимости, которая изменяется от 0,00 до 0,30, что соответствует возможности проведения работ на территории в течение 0-10 дней в месяц [190], в Приморском крае вычисленные значения вероятностей изменяются от 0 до 0,17 [193], на Сахалине благоприятные условия для вызывания осадков в дни с высокой пожарной опасностью наблюдаются от 2 до 4 дней в месяц [174]. Условия, благоприятные для искусственного вызывания осадков в пожароопасных районах Якутии Камчатки представлены в работе [65].

Водозапас облаков рассматривается в качестве показателя ресурсов. Наиболее репрезентативен он для случая, когда известна его доля, которую можно реализовать в виде осадков естественным путем. Для слоистообразных облаков, не дающих естественных осадков, возможное количество дополнительных осадков можно оценить, если известны водозапас, коэффициент реализации водозапаса в осадки при засева, продолжительность пребывания облаков над районом и скорость их смещения [18, 160, 169, 197]. Для конвективных облаков разработана методика оценки водозапасов по радиолокационным наблюдениям и расчетам по методу слоя [15, 199, 248].

Водозапасы мощных кучевых облаков зависят преимущественно от мощности облака. Для северо-западного региона А. А. Синькевичем [208] предложена формула определения водозапаса конвективных облаков в виде

$$W_{cp}=0,2 \Delta H, \text{ где} \quad (1.5)$$

W_{cp} – среднее значение водности в граммах на кубический метр (г/м^3),
 ΔH – мощность облака ,км. Наибольшие средние значения водности зарегистрированы в развивающихся конвективных облаках ($W_{cp} = 1,0 \text{ г/ м}^3$), в стадии диссипации средние значения составляют $\rho = 0,4 \text{ г/ м}^3$. Для расчета водозапаса облаков(Q) пункте наблюдений используется формула, приведенная в работе [46]:

$$Q = W_{cp} \Delta H_{cp} S_{cp}, \quad (1.6)$$

где $S_{cp} = SB_{cp}$ –площадь облачного покрова, S- площадь в радиусе 30км от пункта наблюдений, B_{cp} -количество облачности в баллах.

Из проведенных расчетов следует, что единовременный водозапас облачности (Q) изменяется от $5,0 \cdot 10^4$ до $13,0 \cdot 10^4$ тыс.тонн. Наибольшие значения водности получены для южных и дальневосточных регионов. Наибольший среднемесячный водозапас наблюдается в районах Западной и Восточной Сибири (более $170 \cdot 10^4$ тыс. тонн), а наименьший для районов Поволжья и северо-запада ЕЧ РФ (около $65 \cdot 10^4$ тыс. тонн).

Следующим показателем облачных ресурсов является количество естественных осадков [10,17]. На первых этапах работ по воздействиям господствовало мнение, что наиболее перспективными объектами воздействия являются облака, не дающие естественных осадков. Однако в ряде экспериментов было показано, что абсолютное количество дополнительных осадков при засеве этих облаков невелико, в основном из-за малых водозапасов. Информативность этого показателя повышается, если рассматривать осадки только из облаков - объектов воздействия.

При исследованиях климатических ресурсов облаков для искусственного увеличения осадков следует выявить:

- тип осадкообразующих облачных систем и их повторяемость;

- вклад осадков из систем каждого типа в общую сумму осадков;
- возможное увеличение осадков из систем каждого типа, полученное на основании экспериментов по засеву и численного моделирования;
- степень покрытия облаками при каждом типе облачных систем[34, 228, 229].

Работы в целях снижения класса пожарной опасности лесов и борьбы с лесными пожарами производятся с использованием воздушных судов, оснащенных техническими средствами ИВО, и наземными средствами. Рассмотрим подробнее технические средства ИВО, необходимые для тушения лесных пожаров и снижения класса пожарной опасности лесов.

1.10. Технические средства искусственного вызывания осадков на лесные территории

Авиационный комплекс технических средств воздействия в общем случае включает: - специальное воздушное судно; - технические средства воздействия; - реагенты; - средства измерения параметров атмосферы;- средства управления работами по АВ [140].

Технические средства воздействия состоят из кассетных устройств, самолетных аэрозольных генераторов (САГ-П[2,58,106], САГ-ПМ) или ракетных пистолетов для пиропатронов ПВ-26 [116], используемых с легкомоторных воздушных судов типа Ан-2 и др. На рис.1.3 показан засеv мощного кучевого облака с самолета Ан-2.



Рис. 1.3.Засев конвективного облака с экспериментального кассетного устройства ЭКУ-САГ-П (фото Васильева С.Л.)

Самолеты Ан-26Б и Ан-32п оснащены системой АСО (модификация АСО-2И) для отстрела пиропатронов ПВ-26 (ПВ-26-95, ПВ-26-01) с капсюлем центрального боя или электровоспламенителем [2, 114].

Из существующих реагентов используют йодистое серебро (1-2% от общего объема пиротехнической смеси (САГ-П) или с 8% составом AgJ – АД-1 (САГ-ПМ))[1]. ГУ «ГГО» использует для ИВО экспериментальные гигроскопические реагенты (САГ-ФХС) в макетах пиропатронов ПВ-26 с капсюлем центрального боя [108, 116].

Распоряжением Росгидромета от 14.11.2005г. № 53р рекомендовано применение самолетного аэрозольного генератора САГ-ПМ с высокоэффективным льдообразующим пиротехническим составом АД-1 с самолетов, оснащенных штатными кассетами КУСАГ-ПМ в работах по активному воздействию на гидрометеорологические и другие геофизические процессы.

Установлено, что от одного САГ-П при температуре минус 10 °С обеспечивается выход льдообразующих частиц до 2×10^{13} . Разработанные к настоящему времени генераторы САГ-П различаются по времени дымообразования (60 и 100 с), что обеспечивает создание линейного источника, протяженность которого достаточна для засева мощных кучевых облаков выбранного класса одним САГ-П.

Система приведения в рабочее состояние САГ-П обеспечивает нужные диапазоны дозировок в зависимости от метеоусловий и решаемой задачи. Питание системы управления осуществляется от бортовой сети $27 \text{ В} \pm 10 \%$. Время горения пиросостава САГ-ПМ(01) $120 \pm 20 \text{ с}$, выход льдообразующих ядер- $10^{14} - 10^{15} \text{ г}^{-1}$, содержание йодистого серебра соответственно 2 и 8%.

При воздействиях с земли засев облаков может осуществляться с помощью наземных генераторов, или с помощью ракет и снарядов, оснащенных реагентом для ИВО[140]. По разработке «Агентства АГТЕХ» на базе фейерверка 105 мм калибра был создан и серийно выпускается

генератор типа ГЛА-105 с льдообразующим реагентом. Генератор ГЛА-105 может использоваться как в стационарном, так и в подвижном варианте.

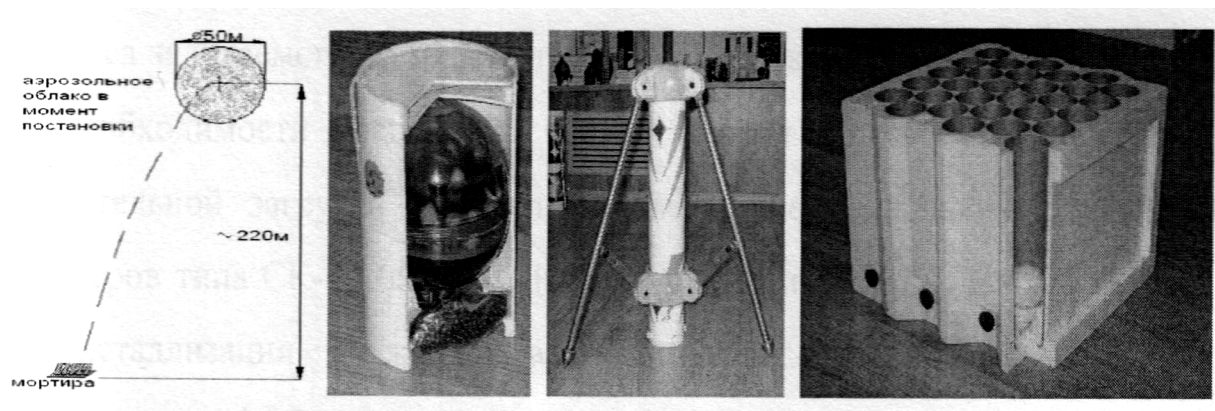


Рисунок 1.4. Генератор фейерверчного типа ГЛА – 105, и пусковые установки - одноствольная и многоствольная [140].

Самолеты пожарной авиации могут использовать и другие реагенты, разработанные за рубежом (США, Болгария и др. страны), содержащие йодистое серебро или гигроскопические вещества (NaCl и др). Для этого могут быть использованы любые типы самолетов, в т.ч. и средневысотные, но предварительно самолет должен быть оборудован навесными креплениями-держателями факелов [279], согласованными с конструкторским КБ. Факела, размещаемые на навесных креплениях, могут быть любыми, однако стандартный факел, применяемый в Аргентине и Австрии имеет габариты 26x360 мм при весе пиросостава 150 – 200 г. В среднем расход пиросостава составляет 2-4 кг/час.

В качестве реагента для воздействий на облака с целью ИВО может использоваться вода в виде аэрозоля [136, 167]. Аэрозоль представляет собой коллоидную систему, где в газообразной среде взвешены (диспергированы) частички твердых или жидких веществ. Свойства аэрозолей делают экономически выгодным применение технологий с их использованием в самых разнообразных производственных процессах. Для засева облаков водным аэрозолем, растворами гигроскопических веществ или

порошкообразными реагентами могут быть использованы различной конструкции форсунки [20, 239].

Дробление жидкости на капли происходит под действием ряда факторов. Механический способ распыления применим для любых жидкостей, поэтому он является наиболее распространенным в практике авиационного применения. Для распыления жидкостей используют разнообразные форсунки, предназначенные для распыления жидкости на большое число капель и распределения этих капель в пространстве. Распыление жидкости является сложным физическим процессом, зависящим от многих внешних и внутренних причин. Основной внешней причиной является воздействие на поверхность струи аэродинамических сил, величина которых зависит от относительной скорости струи и плотности окружающего газа. Аэродинамические силы стремятся деформировать и разорвать струю, а силы поверхностного натяжения препятствуют этому.

Внутренними причинами распада являются различного рода начальные возмущения, вызываемые, например, нарушением цилиндрической формы струи при выходе из сопла и т.п. Внешние причины в большинстве случаев являются определяющими для процесса распыления [20], поэтому при разработке классификации форсунок исходят из способа создания перемещения струи относительно газообразной струи.

По этому признаку форсунки можно разделить на три группы:

- форсунки, в которые жидкость подается под давлением и распыляется вследствие неустойчивости жидкой струи, трения струи о воздух или при ударе струи о неподвижную деталь прибора;

- форсунки, представляющие собой вращающиеся диски или чашу, в центр которых подводится жидкость. Распыление вызывается центробежной силой, разрывающей жидкость на капли;

- форсунки с газовым распылением, в которых поток жидкости разрывается быстродвижущимся потоком газа[20].

Форсунки, работающие под давлением, широко распространены.

Форсунки с газовым распылением применяют в самых разнообразных случаях, но они расходуют значительно больше энергии, чем форсунки под давлением. Решающим фактором, который определяет размер капель, получаемых в форсунках с газовым распылением, является отношение между количеством газа и жидкости, подаваемым в форсунку. При недостаточном количестве газа образуются большие капли, вылетающие далеко за пределы облака мелких капель.

Распыление жидкости на самолетах и вертолетах производится под давлением с помощью форсунок, к которым подводится распыляемая жидкость. Мелкое распыление обеспечивается не только установкой распылителей малого сечения, но и влиянием других факторов: повышением давления, уменьшением секундного выпуска жидкости и увеличением скорости полета. Причем при повышении давления более 10 атмосфер при одинаковом диаметре форсунок средняя величина капель уменьшается незначительно.

Дисперсность капель является основным показателем, характеризующим работу распыления. При распылении имеющейся авиационной аппаратурой получается полидисперсная система капель жидкости, величина которых может колебаться в широких пределах.

Различают три основных класса дисперсного опрыскивания при содержании не менее 80% жидкости в виде капель размером:

- от 5 до 25 мкм - высокодисперсное;
- от 25 до 50 мкм – мелкокапельное;
- свыше 50 мкм – крупнокапельное.

Из-за невозможности показа в полидисперсной системе размеров всех капель условились по определенной выборке оценивать дисперсность средними величинами диаметров. Чем однороднее капли, тем меньше может быть выборка, и тем точнее среднее значение величины диаметра будет характеризовать дисперсную систему.

Наиболее распространенными характеристиками дисперсности являются средний диаметр каплей (СДК) и массово-медианный (ММД). Массово-медианный диаметр (ММД) определяется как диаметр капли, делящий весь объем распыленной струи на две равные части, т.е. суммарные объемы каплей, размеры которых больше или меньше ММД.

Значительное влияние на качество распыления оказывают метеорологические факторы, основными из которых являются: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра и состояние атмосферы (время дня, наличие или отсутствие вертикальных движений воздуха).

Температура и относительная влажность воздуха влияют на испарение каплей: тонкий распыл гораздо быстрее испаряется, чем грубый распыл, потому что тонкий распыл обладает большей поверхностью, подвергающейся испарению. Размер каплей уменьшается за счет испарения, пока не будет достигнуто равновесие между каплей и окружающей средой. Срок существования капли зависит от начального диаметра капли и скорости испарения. Причем капли рабочего состава на основе воды намного быстрее испаряются, чем капли рабочего состава на основе гигроскопического раствора.

В устойчивой атмосфере свободно падающая капля после короткого времени ускорения достигает постоянной конечной скорости, которая зависит от начального диаметра капли. Капли размером < 100 мкм оседают очень медленно, < 25 см/с в то время, как капля диаметром 200 мкм оседает со скоростью 72 см/с [165,167].

Поскольку скорость оседания для различных частиц различна, то и время нахождения частиц в воздухе при подъеме воздушным потоком или падении их с одной и той же высоты будет разным.

При авиационном распылении в воздух выбрасывается струя частиц различной дисперсности, падающих с различной скоростью и по различным траекториям.

Крупные частицы, падающие с большой скоростью, располагаются по линии полета, а мелкие разносятся в разные стороны, потому что они падают медленнее и дольше остаются в воздухе во взвешенном состоянии. Часть же мелких твердых частиц, также, как и капель жидкости из-за малой скорости их оседания и турбулентного состояния воздуха относится на большое расстояние от линии полета. Считается, что при авиационном опрыскивании имеются капли с диаметром от 10 до 300 мкм, время нахождения их в воздухе будет колебаться в широких пределах от нескольких секунд до двух часов и более.

Введение распылением капель воды в растущее конвективное облако для ИВО целесообразно проводить у границ конвективного облака с использованием струйных форсунок. Форсунки распыляют жидкости до мельчайших капель. Конструкция двухфазной форсунки обеспечивает точный контроль размера капель и их распыление.

Преимущества струйных форсунок заключаются в следующем:

- Возможность диспергирования капель размером до 5 микрон
- Регулирование размера капель путем изменения давления воздуха
- Из 1 галлона (3,785 л) жидкости возможно получить до 50 триллионов капель с общей площадью поверхности более 4700 м².

Номинальная скорость распыления - более 400 л/мин Форсунки могут распылять суспензии, содержащие растворы и твердые частицы (например, суспензию, содержащую до 80% твердой фазы). Распыление происходит при более низком потреблении энергии. Форсунки [239] применяются практически во всех отраслях промышленности и могут быть установлены на всех типах самолетов, используемых для профилактических работ и тушения лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками.

К средствам измерения и регистрации параметров атмосферы и облаков для самолета-оператора по воздействиям следует относить штатное оборудование самолета: высотомер, вариометр, указатель температуры, указатель скорости самолета и курса полета, GPS/GLONAS. К внештатному

оборудованию – угломер (сектант), секундомер, электрометеорограф, измеритель влажности облаков[175], видеокамеры, персональный компьютер и другие технические средства.

Выводы к Главе 1

В первой главе рассмотрены вопросы мониторинга лесных пожаров, оценен экологический и социальный ущерб от лесных пожаров; изложены последствия лесных пожаров; приведен обзор результатов работ по ИВО для борьбы с лесными пожарами с использованием реагентов и технических средств воздействия на атмосферные процессы. Лесные пожары являются природным бедствием, возникающим в результате преимущественно антропогенных факторов и приводящими к ряду чрезвычайных ситуаций, связанных не только с уничтожением лесов, но и гибелью флоры и фауны. При лесо-торфяных пожарах в атмосферу поступает большое количество взвешенных частиц («черный углерод»), «парниковых» и химически активных газов, которые поднимаются до высоты 12 км и попадают в стратосферу. Пожары вносят вклад в потепление климата, оказывают влияние на региональную погоду, формируя области высокого давления, которые циклоны обходят стороной.

Пожары также оказывают пагубное влияние на здоровье людей. Задымленность от пожаров сказывается на заболеваемости в период до четырех лет после события, увеличивается смертность населения. Предотвращение и тушение лесных пожаров является крупной народно-хозяйственной проблемой на территории РФ, на решение которой ежегодно расходуются большие материальные и финансовые средства.

Особенностью работ по ИВО для проведения профилактических работ по снижению КПО и тушения лесных пожаров является преимущественное использование ресурсной облачности, которая в теплый период года наблюдается в среднем по различным регионам от 4 до 8 дней в месяц. Существенное значение имеет противопожарная профилактика лесных территорий для снижения КПО, так как при отсутствии лесных пожаров

всегда можно выбрать соответствующие метеоусловия и время, когда можно проводить успешные воздействия по ИВО для снижения КПО до нуля. При отсутствии ресурсной облачности приоритетным направлением деятельности авиалесоохраны является работа по предотвращению лесных пожаров.

Приведенный в главе обзор работ для снижения КПО и тушения лесных пожаров, выполненных в XX столетии, свидетельствует о том, что остается еще много нерешенных вопросов по методам активных воздействий для борьбы с лесными пожарами. Одним из таких вопросов является отсутствие почасового суточного индекса пожарной опасности лесов, так как ежедневная вероятная плотность действующих пожаров является абсолютным критерием пожарной опасности в лесах. Предложен новый физически обоснованный индекс оценки пожарной опасности лесов, учитывающий суточные изменения температуры и относительной влажности по установленным восьми срочным наблюдениям метеовеличин.

Используемые в работах технологии АВ и технические средства для ИВО, а также измерения характеристик метеовеличин при работах по предотвращению и тушению лесных пожаров, требуют дальнейшего усовершенствования с точки зрения повышения эффективности проведения воздействий и оценки их результатов.

Глава 2. Физические основы искусственного вызывания осадков водным аэрозолем

2.1. Опыты по использованию водного аэрозоля

В Главе 2 рассматривается использование водного аэрозоля для искусственного регулирования осадков в целях предотвращения засушливых явлений и лесных пожаров.

Проблема активных воздействий (АВ) на облака и туманы решается применением различных реагентов. К настоящему времени известны несколько категорий реагентов для воздействия на слоистообразные и

конвективные облака, находящиеся по температурным условиям в теплом ($> 0^{\circ}\text{C}$), переохлажденном (водяные капли) или смешанном (капли и кристаллы) состоянии. Среди них наиболее распространенными являются хладореагенты (твердая углекислота, жидкий азот), кристаллизирующие (йодистое серебро и др.), гигроскопические вещества (поваренная соль, карбонид и др.).

Основная цель АВ вызвать небольшими энергетическими воздействиями реализацию энергии атмосферных процессов, в несколько порядков превосходящую исходный импульс. Эти искусственные воздействия предназначены для приведения в действие спускового механизма цепной реакции перехода атмосферного явления из метастабильного (неустойчивого) состояния в устойчивое. Преимущественное направление использования перечисленных выше реагентов - оказывать воздействие на осадкообразующий механизм в облаках различных форм. Так, в теплых облаках для выпадения осадков необходимо интенсифицировать механизм гравитационной коагуляции капель. В переохлажденных и смешанных - закристаллизовать облачные капли и, используя разность в упругости насыщения между водой и льдом [18], вызвать переконденсацию водяного пара с облачных капель на кристаллы для их укрупнения и выпадения в виде осадков.

Поиски реагентов для искусственного вызывания дождя начались в конце XIX века. Первый патент на использование углекислоты был выдан в США за № 462795 от 1891г. В начале 30-х годов голландский ученый A.W.Veraart вызвал дождь, используя в качестве реагента твердую углекислоту, но только в 1946г. американский ученый V.J.Schaefer сделал теоретическое обоснование использования этого реагента [178]. Основным недостатком твердой углекислоты и йодистого серебра является температурный порог применения реагентов (для CO_2 – минус 4°C , а для AgI – минус 6°C). Одновременно с этими реагентами для АВ использовались гигроскопические вещества в виде растворов или порошков и обыкновенная вода, диспергированная по различным размерам капель.

Схема воздействия реагентами выглядит следующим образом: облачная среда (As-Ns, Cu cong, Cb) – реагент (CO₂, AgJ, NaCl и др.) – капли (кристаллы) - осадки (выпадение, изменение интенсивности, предотвращение выпадения). Водный аэрозоль, не имеющий температурного порога применения, может заменить в этой цепочке большинство используемых в настоящее время дорогостоящих и не всегда эффективных реагентов с большим экономическим эффектом, доступностью и оперативностью при любой температуре облачной среды.

Эксперименты по засеву облаков каплями воды проводились в ряде стран [167,243]. В 40-х и 50-х гг. прошлого столетия были проведены опыты по введению в облака капель воды с целью стимулирования образования дождя за счет процесса коагуляции. В опытах вода вводилась в вершину или в основание облака. В вершины облаков вода выпускалась из бака при пролете над ними. Спектр распределения капель по размерам соответствовал медианному размеру капель 1 мм. В результате происходило частичное или полное рассеяние облаков мощностью до 2000 м.

В Австралии в 1952г. засев проводился каплями радиусом 25 мкм на высоте, превышающей на 300 м высоту нижнего основания облака. В большинстве случаев наблюдались изменения в эволюции засеянных облаков по сравнению с контрольными, из некоторых из них выпадали осадки. Позднее, ученые Чикагского университета описали эксперименты, в которых вода разбрызгивалась в основания теплых облаков над Карибским морем. В этих экспериментах выбирались контрольное и основное облако, которое засевалось каплями при преобладающем диаметре 100 мкм. Засев 32 облаков с введением в облако 500 л воды на 1 км не дал заметного эффекта, при увеличении объема воды до 2700 л на 1 км 22 из 46 засеянных облаков дали осадки. Из контрольных облаков осадки выпадали в 11 случаях.

Количество реагента введенного в основание облака или в его вершину может играть существенную роль в укрупнении капель. Результаты опытов показали, что при определенных условиях засев теплых облаков каплями

воды вызывает осадки. Опыты по разбрызгиванию капель размером около 50 микрон в основаниях облаков были успешными. При воздействии на растущие кучевые облака мощностью до 1500 м они рассеивались, оставляя в некоторых случаях полосы падения. При воздействии на более мощные облака выпадал дождь, который по количественной оценке был существенно более сильным, чем дождь, выпадающий из незасеянных облаков. Однако использование засева облаков каплями воды считалось экономически невыгодным, т. к. требовалось введение внутрь облака большого количества воды. Вследствие этого метод воздействия каплями воды не нашел применения из-за сложности доставки больших объемов реагента в облако и диспергирования одинаковых размеров капель.

При наличии современных самолетов-танкеров типа Ан-32п, Бе-200п, Ил-76п, способных поднять от 8 до 42 т воды и снабженных струйными форсунками, например, Turbotak, позволяющими распылять из одного галлона воды (3,785 л) свыше 7 триллионов ($7,2 \cdot 10^{12}$) капель одного радиуса, этот недостаток устраняется. Объем жидкости (воды), поднимаемой воздушными судами, приведен в табл.2.1.

Таблица 2.1. Объем жидкости (воды), поднимаемой воздушными судами.

Обозначения	Тип воздушного судна						
	Ан-2п	Ан-26п	Бе-12п	Ан-32п	Бе-200п	Ми - 26п	Ил-76п
Объем воды, л	1200	4000	6000	8000	12000	20000	42000

Рассмотрим более подробно физические основы применения водного аэрозоля. Для этого рассмотрим структуру воды и взаимодействие атмосферных ионов с водным аэрозолем.

2.2. Структура воды

Поскольку речь идет о фазовых переходах воды, коагуляции и седиментации капель, то естественно провести анализ исследований, касающихся особенностей структуры воды. На основании такого анализа

определяются основные положения о структуре воды, которые будут использованы в дальнейших расчётах взаимодействия заряженных частиц (ионов) с молекулами воды при фазовых переходах и укрупнении капель.

На молекулярном уровне вода представляет собой совокупность случайным образом расположенных водородных связей. В жидкой воде, как известно [13,67,68,235,255], водородная связь образуется между атомами водорода одной молекулы воды и атомом кислорода другой молекулы воды согласно схеме (рис. 2.1.):

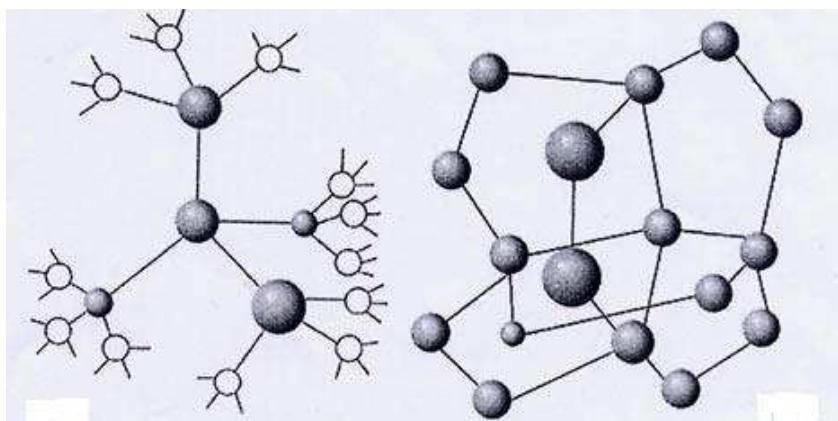


Рисунок 2.1. Водородные связи в структуре воды [67].

Любая молекула может быстро сменить окружающие её соседние молекулы. Тепловое движение молекул воды характеризуется периодом колебаний молекулы относительно положения равновесия, равного 10^{-13} с и временем «оседлой жизни», составляющим для чистой воды 10^{-11} с, для льда это время значительно больше – 10^{-5} с. В воде часть водородных связей оказывается разорванной. При своём перемещении по объёму молекула воды может быть окружена 4-5 и даже 6 молекулами. В среднем же молекула воды имеет 4,4 соседей - координационное число молекул воды равно 4,4. Центры масс соприкасающихся молекул находятся на расстоянии $2,94 \text{ \AA}$, для льда - $2,76 \text{ \AA}$. Концентрация молекул воды - $3,34 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, льда - $3,1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, масса молекулы воды - $2,99 \cdot 10^{-23}$ г., графически молекула воды представлена на рис. 2.2.

Если допустить, что молекула воды представляет собой «твёрдый шарик» радиусом $1,4\text{Å}$, то площадь, занимаемая одной молекулой, будет равна $6,15 \cdot 10^{-16}\text{см}^2$, на 1 см^2 площади вплотную разместились бы $1,63 \cdot 10^{15}$ молекул. На самом же деле молекулы при "плотной упаковке" занимают только 0,53 часть площади и 0,38 часть объёма общей массы воды. На рис.2.3. показана капля воды под микроскопом, отчетливо видны отдельные ассоциированные кластеры молекул воды и пустоты между ними[257].

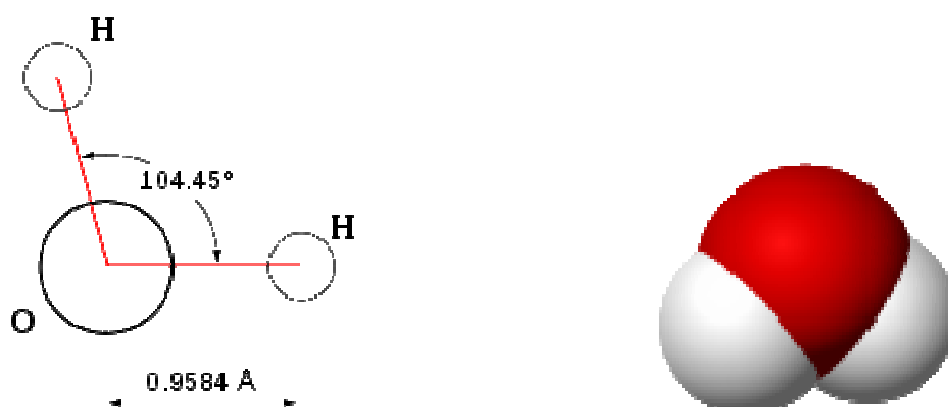


Рисунок 2.2. Вода, вид молекулы (www.wikipedia.org)

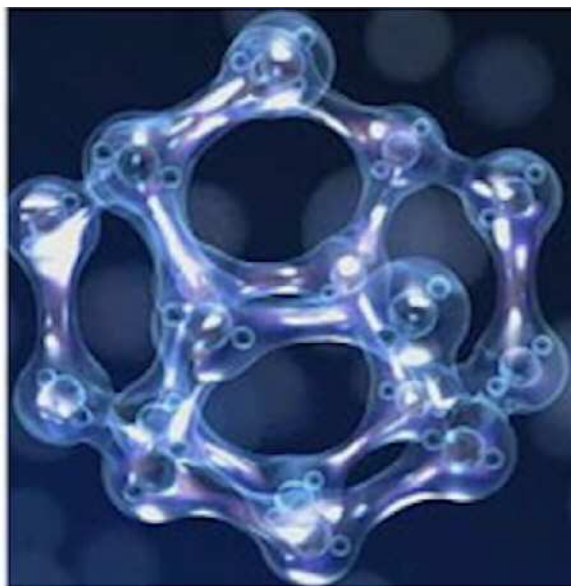


Рисунок 2.3. Капля воды под микроскопом (фото Масару Эмото).

Теоретические расчёты показывают, что величина энергии водородной связи в воде составляет приблизительно 2,3 - 8,6 ккал/моль. В пересчёте на

одну молекулу (каждая связь относится к двум молекулам) это будет около 0,1 эВ/молекула. В порядке сопоставления, ионная связь составляет 8-10 эВ/молекула, ковалентная - 5 - 10 эВ/молекула, сила Ван-дер-Ваальса равна примерно 10^{-2} эВ/ молекула. При переходе воды в пар расходуется энергия 0,39 эВ/ молекула, а при плавлении льда - 0,06 эВ/ молекула . Если считать, что переход воды в пар требует разрыва всех водородных связей, а переход льда в воду - только малой части их, то это будет всего 0,06/0,39 ~15%. Следовательно, в воде сохраняются ~ 85% водородных связей льда. Вместе с тем даже в газообразном состоянии некоторое число молекул воды сохраняет водородные связи. Полностью водородные связи будут разорваны лишь в водяном паре при $T = 600^\circ$ [67].

Распределение электрического заряда в молекуле воды описывается мультипольными моментами (формула 2.1). Если $\rho(\mathbf{r})$ - плотность заряда с координатами \mathbf{r} , то компоненты дипольного (μ_α), квадрупольного ($Q_{\alpha\beta}$) и октупольного ($\Omega_{\alpha\beta\gamma}$) моментов определяются соответственно как $\mu_\alpha = \int r_\alpha \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$; $Q_{\alpha\beta} = \int r_\alpha r_\beta \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$;

$$\Omega_{\alpha\beta\gamma} = \int r_\alpha r_\beta r_\gamma \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{r}; \mathbf{r} (x,y,z); r_1=x; r_2=y, r_3=z. \quad (2.1)$$

Экспериментально определяется только дипольный момент для водяного пара, который есть произведение длины диполя l на заряд его полюса e : $\mu_\alpha = le$. Порядок величины μ_α 10^{-29} , так как отрицательный заряд электрона равен $1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{К}$ (элементарный электрический заряд), а длина диполя – величина того же порядка, что и диаметр молекулы. Для воды $\mu_\alpha = 6,13 \cdot 10^{-29}$ Кл·м. Остальные компоненты мультипольных моментов рассчитываются методами квантовой механики в декартовой системе координат[234].

Наличие дипольного момента у воды показывает, что молекула воды не обладает центром симметрии, а его величина зависит от состояния воды.

Дипольный момент изменяется при возбуждении молекулы в связи с изменением его геометрии.

Колебания электронной плотности в пределах каждого атома вызывают колебания электрического (дипольного) момента в воде, что сказывается на появлении притяжения между твердыми и газовыми частицами со знаком (+) и газами со знаком (-) с противоположными по знаку зарядами молекулы воды. Поэтому, за счет диполей вода адсорбирует и положительно и отрицательно заряженные частицы, являясь при этом универсальной поглощающей системой [235], схематично представленной на рис.2.4.

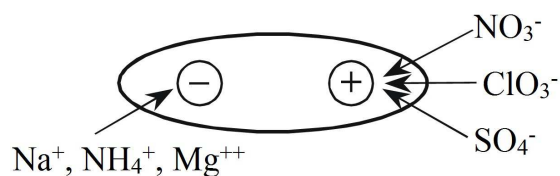


Рисунок 2.4. Схема взаимодействия воды и аэрозольной составляющей воздуха

Поскольку молекулы воды дипольные, их «конструкционные» свойства как универсального растворителя можно объяснить тем, что (возьмем «структурную единицу» воды - пластину) в каждую «структурную единицу» воды влетает частица или частицы веществ (ионы) и остаются в ней соответственно полюсу диполя воды, т.е. газы Cl_2^- , F_2^- , N_2^- , O_2^- и т.д. внедряются в плюсовую часть диполя, а Na^+ , K^+ , Mg^{++} и т.д. - в минусовую часть. Если атмосферные аэрозоли представляют собой смесь положительно и отрицательно заряженных частиц, то вода за счет двухполюсной системы молекул приобретает свойство «универсальности», захватывая одновременно и «легкие» и тяжелые частицы различных размеров.

2.3. Атмосферные ионы

Заряженные частицы в атмосфере являются основными источниками ионизации воздуха. Атмосферные ионы возникают в результате ионизации, генерируемой космическими лучами, радиоактивностью почвы, воздуха, грозовой активностью и другими факторами, и играют существенную роль в процессах облако- и осадкообразования в естественных условиях. Взаимодействие атмосферных ионов с аэрозольными частицами сопровождается, как правило, конденсационным ростом частиц. Впервые на это обратил внимание С. Вильсон, наблюдая мгновенную конденсацию водяного пара в камере с пересыщением в 400% при введении ионов. Это означает, что на начальной стадии развития облачности изменение ее физических характеристик тесно связано с атмосферными ионами. На стадиях зрелости и диссипации более существенны коагуляционные и контактные процессы в механизмах осадкообразования и электризации. Влияние заряженных частиц на интенсивность осадков в атмосфере рассматривалось в ряде работ [74, 168, 171, 181, 230, 249 и др.].

Ионная электризация – один из наиболее исследованных процессов заряжения частиц в атмосфере, однако механизм ионной электризации в облаках не является исчерпывающе изученным. Изучение ионных характеристик обычно связано с изменениями электрического поля атмосферы при отсутствии облаков, туманов, сильного ветра и др. явлений. Было показано, что появление в атмосфере ионов вызвано ионизацией, интенсивность которой J_{\pm} у поверхности земли составляет около 10^7 пар ионов/(м³с). При этом 20% величины J_{\pm} связано с космическими источниками, 35% - с радиоактивностью почвы, а 45% - с радиоактивностью воздуха. Изменение интенсивности ионизации с высотой следующее: вначале величина J_{\pm} убывает, достигая минимума на высоте около 3 км, а затем возрастает; в нижней стратосфере на высоте порядка 12 км J_{\pm} становится максимальной, после чего начинает убывать с высотой (рис.4.1). Такие

изменения объясняются уменьшением влияния радиоактивности почвы и воздуха [174].

Первичные продукты ионизации (свободный электрон и положительный ион) соединяются в среднем менее чем за 10^{-2} с с нейтральными газовыми молекулами, создавая сравнительно устойчивые ионы из комплексов этих продуктов. За счет процессов рекомбинации, образования тяжелых ионов и заряжения аэрозолей концентрация легких ионов уменьшается. Среднее время между образованием легкого иона и прилипанием его к ядру конденсации по оценке Брикара составляет 20-50с [174]. У поверхности земли концентрация легких ионов n_1 составляет 10^8 м^{-3} при преобладании положительных ионов по разным источникам $n_1/n_2 = 1,1 \div 1,2$.

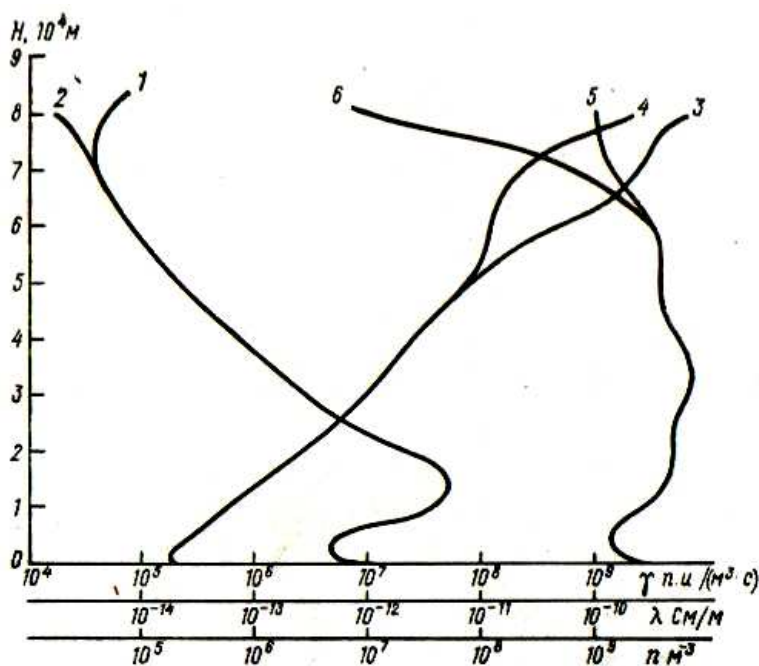


Рисунок. 2.5. Профили ионных характеристик атмосферы по Коулу и Пирсу [174].

1,2 – зависимость интенсивности ионизации γ от высоты (день и ночь соответственно); 3,4 – зависимость проводимости λ от высоты (день и ночь соответственно); 5,6 – зависимость концентраций n_1 и n_2 соответственно, рассчитанная для дневных условий.

Для n_1 и n_2 справедливо следующее уравнение [174]:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{V}n_i) - \operatorname{div}(K^i \operatorname{grad}n_i) = \gamma - an_1n_2 - n_i \sum_{\chi=-\infty}^{\infty} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} dr \beta_i(\alpha, r) N(\alpha, r, \mathbf{R}, t) \quad (2.2)$$

Здесь \mathbf{V} – скорость движения воздуха в точке \mathbf{R} в момент времени t , $\beta_i(\alpha, r)$ – частота захвата легкого иона частицей радиусом r и зарядом αe , $N(\alpha, r, \mathbf{R}, t)$ – вероятность встречи в точке \mathbf{R} иона и частицы радиусом r и зарядом αe , K^i – диагональный тензор с элементами турбулентной диффузии. Частные случаи уравнения (4.1) используются при рассмотрении концентрации легких ионов, $\operatorname{grad}n_i$ – градиент n_1 и n_2 .

Прохождение атмосферных фронтов и гроз приводит к существенному увеличению концентрации легких ионов, что свидетельствует об интенсивных процессах ионизации в облаках. Ионизация в облаках происходит при разрушении капель, коронных разрядах между каплями в электрическом поле и других микрофизических процессах. Для рассмотрения взаимодействия ионов с водным аэрозолем приведем некоторые сведения о структуре воды.

2.4. Избирательные свойства поверхности воды

Избирательные свойства поверхности воды связаны с двойным электрическим слоем (ДЭС) на границе вода-атмосфера. ДЭС на границе вода-атмосфера образуется в результате несимметричности молекулы воды, состоящей из двух разнородных атомов. В результате этого, в поверхностном слое жидкости существует слой ориентированных полярных молекул воды, причем молекулы H_2O на поверхности воды ориентированы отрицательными полюсами наружу, а положительными внутрь. Согласно теории Я. И. Френкеля [241], избирательная адсорбция ионов поверхностью воды объясняется более легким проникновением отрицательных ионов через двойной электрический слой, чем положительных. Это обусловлено тем, что под влиянием электрического поля ориентированных диполей (на рис.2.3 отчетливо видно, что положительные полюсы молекул воды в капле

направлены в сторону пустот) отрицательно заряженные ионы, попадающие на водную поверхность, начинают двигаться внутрь жидкости, а положительные ионы остаются на поверхности и могут испаряться также, как и нейтральные молекулы воды.

В результате различия энергетических затрат на преодоление поверхностного слоя ионами противоположных зарядов по обе стороны от водной поверхности происходит формирование областей с электрическим зарядом противоположного знака, и равного значения, то есть на поверхности возникает ДЭС. Современная теория строения ДЭС, предложенная Штерном, обобщает две существовавшие ранее теории Гельмгольца-Перрена и Гуи-Чепмена [174]. Согласно этой теории в жидкости располагается ряд ионов одного знака, а в прилегающем воздухе часть ионов противоположного знака (противоионов), расположена в слое толщиной d АДС (слой Гельмгольца), а другая часть противоионов образует диффузионный слой (слой Гуи), в котором концентрация ионов изменяется по экспоненциальному закону по мере удаления от поверхности воды.

Потенциал в адсорбционном слое убывает линейно, а в диффузионном слое по экспоненциальному закону. За толщину диффузионного слоя принимают расстояние, на котором потенциал убывает в $e(2.718...)$ раз.

При уменьшении температуры хаотическое движение ионов замедляется, и толщина диффузионного слоя уменьшается вплоть до толщины адсорбционного слоя. Поверхностью воды захватываются только ионы, у которых кинетическая энергия больше значения потенциального барьера A . На границах такого ДЭС скачок потенциала равен -0.26 В, а толщина слоя равна $5 \cdot 10^{-9}$ м. Из-за наличия избирательных свойств водной поверхности при одинаковой проводимости положительных и отрицательных ионов в атмосфере, поверхность воды будет заряжаться отрицательно.

Применительно к облачным каплям, Н.С. Шишкиным было показано, что только в случае, когда проводимость положительных ионов примерно в

два раза превышает проводимость отрицательных ионов, заряд водной поверхности становится равным нулю [248]. Н.С.Шишкин феноменологически учел избирательные свойства поверхности капель для диффузионного режима электризации. Вместе с тем, обнаруживается тенденция к увеличению расхождений между теорией и экспериментом по мере уменьшения размера частиц. Вероятной причиной этого могут быть зеркальные силы.

Заметим, что в целом проблема определения выражений для ДЭС связана с описанием трехмерных случайных блужданий ионов в среде со случайными источниками ионов (акты ионизации) и случайными стоками (аэрозольные частицы, тяжелые ионы, капли и т. п.). Построить такую теоретическую схему чрезвычайно сложно, так что обычно ограничиваются решением более простых задач. В них использованы следующие предположения:

- электризующие частицы не взаимодействуют между собой;
- процесс формирования тока ионов на частицу стационарен;
- имеются только однозарядные ионы.

Применимость первого предположения подтверждена многочисленными оценками. Согласно Н. А. Фуксу, время перестройки поля концентрации атмосферных ионов (при изменении заряда электризующейся частицы) меньше среднего времени между актами захвата частицей ионов, то есть справедливо стационарное описание поведения ионов (второе предположение).

Влияние двойного электрического слоя на заряженные частицы нейтрализуется при избыточном отрицательном заряде воды, который создает электрическое поле, равное по модулю и противоположное по направлению электрическому полю двойного слоя. В равновесном состоянии скачок потенциала в ДЭС на поверхности капли компенсируется электрическим полем отрицательного заряда капли:

$$\varphi = Q/4\pi r\epsilon_0, \quad (2.3)$$

где ϕ - скачок потенциала в ДЭС; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, r - радиус капли (м).

Отсюда, значение равновесного заряда Q капли равно (Кл):

$$Q = 4\pi r \epsilon_0 \phi \quad (2.4)$$

На ионы действует электростатическая сила, F :

$$F = Qq/4\pi r^2 \epsilon_0, \quad (2.5)$$

При этом напряженность электрического поля равна:

$$E = Q/4\pi r^2 \epsilon_0, \quad (2.6)$$

а потенциальная энергия (W) положительно заряженного иона:

$$W = Qq/4\pi r \epsilon_0 \quad . \quad (2.7)$$

В соответствии с законом Больцмана, распределение ионов в поле вокруг капли будет описываться формулой:

$$N_{\pm}(r) = N_{\pm}(\infty) \exp(-Qq_{\pm}/4\pi r \epsilon_0 kT), \quad (2.8)$$

где $N_{\pm}(r)$ – концентрация ионов у поверхности капли; $N_{\pm}(\infty)$ - концентрация ионов на удалении от капли.

На основании приведенных выражений можно получить скорость изменения электрического заряда капли [245]:

$$dQ/d\tau = q_+ \pi r^2 V_+ N_+(\infty) \exp(-Qq_+/4\pi r \epsilon_0 kT) \exp(-A/kT) + q_- \pi r^2 V_- N_-(\infty) \exp(-Qq_-/4\pi r \epsilon_0 kT) \quad (2.9)$$

и где V_{\pm} - средняя тепловая скорость движения ионов.

Выражение для равновесного заряда капли $q_+ = q_-$ может быть получено при $dQ/d\tau = 0$:

$$Q = 2\pi r \epsilon_0 kT / q_+ \{ \ln(V_+ N_+(\infty) / V_- N_-(\infty)) - A/kT \} \quad (2.10)$$

По формуле (2.10) теоретически определяются предельные заряды капель в облаке: максимальный положительный заряд $Q^+_{\max}(r) = 4\pi r^2 \epsilon_0 \cdot 2 \cdot 10^{10}$ и максимальный отрицательный $Q^-_{\max} = 4\pi r^2 \epsilon_0 10^9$. (Нет единиц) Если

величина Q превосходит максимальный заряд капли, то энергия электростатического поля заряда капли будет больше ее поверхностной энергии. В этом случае происходит дробление капли из-за близости одноименных зарядов

При поглощении ионов и электронов, было показано, что при данной напряженности электрического поля и при данном размере частицы существует максимально возможный заряд этой частицы. Однако заряд жидкой капли не может достигать предельного значения, определяемого выражением (2.11), за исключением случаев, когда ее размеры не превышают в диаметре 100 мкм [200,245]. Максимальный заряд капель (по модулю), при котором происходит их дробление (предел Релея) равен [245]:

$$q_R(r) = \sqrt{64\pi^2 \varepsilon_0 \sigma_{ПВ} r^3}, \quad (2.11)$$

где $q_R(r)$ - максимальный заряд капли (по модулю) радиусом r , при превышении которого происходит дробление капли из-за близости одноименных зарядов (предел Рэлея), Кл; ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, равная $8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

$\sigma_{ПВ}$ - поверхностная энергия на границе пар – вода при температуре T (при $0^\circ\text{C} = 7,61 \cdot 10^{-2}$ Дж/м²).

Происходит это в силу того, что на поглощение капель ионов (электронов) накладывається дополнительное ограничение, получившее название «предел Рэлея». Известно, что заряженная капля будет испаряться до тех пор, пока внешняя сила электрического поля на поверхности капли не превысит внутреннюю силу ее поверхностного натяжения. Тогда, из-за близости зарядов одного знака капля разлетится на части, образуя несколько более мелких капель.

Для капель различных размеров возможные значения предельных зарядов и пределы Рэлея приведены в табл.2.2.

Таблица 2.2. Предельное число элементарных зарядов на частице [200, 245].

Предел	Диаметр частиц, мкм		
	0,01	1,0	100
Ионный	$3,47 \cdot 10^2$	$3,47 \cdot 10^6$	$3,47 \cdot 10^{10}$
Электронный	$1,72 \cdot 10$	$1,72 \cdot 10^5$	$1,72 \cdot 10^9$
Предел Рэля	$4,45 \cdot 10$	$4,45 \cdot 10^4$	$4,45 \cdot 10^7$

Максимальное количество ионов и электронов для капли диаметром 100 мкм составляет $3,47 \cdot 10^{10}$ и $1,72 \cdot 10^9$ соответственно. Для сравнения, на дождевой капле диаметром 10 мм в грозу находится около $4 \cdot 10^8$ элементарных зарядов, что составляет 1% предельного заряда [200]. У испаряющихся капель предел Рэля понижается с уменьшением размера капли. Поэтому, у капель, которые могут испаряться, диаметр будет уменьшаться пока не составит 0,01 мкм.

2.5. Электризация капель воды при разрушении

Впервые электризация жидкости при дроблении была замечена у водопадов Швейцарии в 1786 году. С 1913 года явление получило название баллоэлектрического эффекта. Наиболее значительный эффект электризации воздуха наблюдается у самых больших водопадов мира – у водопада Игуассу на границе Бразилии и Аргентины и у водопада Виктория на реке Замбези в Африке. У водопада Виктория за счет дробления воды возникает электрическое поле напряженностью до 25 кВ/м. С удалением от водосброса это поле уменьшается, и на расстоянии около 1,6 км по горизонтали и 0,5 км по вертикали электрическое поле водопада переходит в нормальное электрическое поле земной поверхности. При дроблении пресной воды в воздух переходит отрицательный заряд. В результате чего, в воздухе у водопадов количество отрицательных ионов превышает количество положительных [7].

У небольшого водопада Учан-Су в Крыму отношение отрицательных ионов к количеству положительных равно 6,2, а у водопада Ак-Су в Средней Азии оно составляет около 4. У берегов морей воздух вместо отрицательного заряда приобретает положительный вследствие того, что здесь происходит разбрызгивание не чистой, а соленой воды. На поверхности морей и океанов разбрызгивание воды происходит при скорости ветра более 10 м/сек, когда на волнах появляются гребешки пены. Отношение положительных зарядов к отрицательным в воздухе над морем при бурном море достигает 2,04; при зыби оно близко к 1,48.

Наибольшая электризация воздуха наблюдается при разбрызгивании чистой воды. С увеличением концентрации примесей, электризация уменьшается и далее меняет знак (в естественных условиях, например, у берегов морей и над морской поверхностью). Выход электричества различен при разбрызгивании капель разной величины [146]. Для капли диаметром 4,4 мм при скорости падения 6,8 м/с высвобождается заряд $0,89 \cdot 10^{-12}$ Кл/см³, в то время, как для капли диаметром 0,4 мм при скорости падения 4 м/сек отдача заряда составляет 10^{-12} Кл/см³. При наибольшей интенсивности разбрызгивания наблюдается выход заряда порядка 10^{-10} Кл на каплю.

Баллоэлектрический эффект наблюдается только у дипольных жидкостей. Основной причиной эффекта является наличие на поверхности жидкости слоя ориентированных диполей, которые создают двойной электрический слой внутри жидкости. Электрическое поле диполей простирается на некоторую глубину внутрь жидкости и концентрирует вблизи ее границ свободные заряды.

Так как при разбрызгивании жидкостей образуются пузыри, в тонкой пленке которых заряд поверхности жидкости уже не будет скомпенсирован зарядом внутренних слоев, в воздух вместе с мельчайшими частицами жидкости уходит и избыточный заряд тонкой пленки пузырей. При адсорбции поверхностью жидкости свободных зарядов из ее внутренних

слоев происходит уменьшение эффективной величины электрического поля внутреннего двойного электрического слоя, и затем изменение его знака. Этим объясняется изменение знака электризации при дроблении дипольных жидкостей с добавлением к ним примесей [7]. Теория электризации при разбрызгивании капель разрабатывалась Дж. Мейсоном и др. исследователями [168]. И.М. Имянитов отмечает, что баллоэффект водяных капель может иметь место только в крупнокапельных осадках [73].

2.6. Влияние ионов на процессы конденсации

Классическая теория нуклеации (КТН) разрабатывалась в 30-40-х годах прошлого столетия [241] и уточняется до настоящего времени [259]. КТН до сих пор используется специалистами в различных областях науки, техники и промышленного производства. Теория вызывает интерес благодаря своей простоте и тому факту, что использует лишь справочные данные для макроскопических процессов. Однако в последние два десятилетия выяснилось, что расхождение теории с экспериментально измеренной скоростью нуклеации может различаться на порядки. Главный источник ошибок заключается в отсутствии учета зависимости поверхностного натяжения критического зародыша от его радиуса. Следующим по значимости источником ошибок является неучёт вклада в свободную энергию от поступательных и вращательных степеней свободы критического зародыша [259]. Тем не менее, для объяснения физического смысла образования зародышей другой фазы КТН [241], с метеорологической точки зрения, является вполне приемлемой.

В условиях естественной атмосферы возникновение жидкой фазы обусловлено первоначальным попаданием молекул водяного пара из паровоздушной среды на смачиваемые частицы - обводнением аэрозольных частиц. Когда обводнённая частица достигает размера равновесного зародыша, начинается конденсационный процесс, интенсивность которого зависит от степени пересыщения водяного пара [198,205].

Рассмотрим возможность конденсации, прежде всего, непосредственно на самих частицах аэрозоля радиусом $10^{-6} - 10^{-5}$ см. Работа образования конденсационного зародыша A на ядре радиуса r_0 выражается как:

$$A = -kT \ln\left(\frac{\rho}{\rho_\infty}\right) \frac{4}{3\pi} \frac{N}{18} (r_k^3 - r_0^3) + 4\pi r_k^2 \sigma_{12} + 4\pi r_0^2 (\sigma_{23} - \sigma_{13}), \quad \sigma_{13} - \sigma_{23} = \sigma_{12}. \quad (2.12)$$

где r_k - радиус критического (равновесного) зародыша, ρ/ρ_∞ - пересыщение водяного пара над плоской поверхностью воды, σ_{ik} - коэффициент поверхностного натяжения на границе сред: 1 - воздух, 2 - вода, 3 - поверхность частицы. Подставляя значения r_k в A - получаем:

$$A = A(r_k) C\left(\frac{r_0}{r_k}\right), \quad A(r_k) = 4\pi r_k^2 \sigma_{12}, \quad C\left(\frac{r_0}{r_k}\right) = 1 + 2\left(\frac{r_0}{r_k}\right)^3 - 3\left(\frac{r_0}{r_k}\right)^2, \quad r_k = \frac{2\sigma_{12}}{kT \frac{N}{18} \ln\left(\frac{\rho}{\rho_\infty}\right)}. \quad (2.13)$$

Обводнённые ядра с точки зрения КТН о кинетике фазового перехода выступают как комплексы начальной фазы данного радиуса. По аналогии с соотношением из [265] имеем:

$$\eta(r_k) = \eta(1) \exp\left\{-\frac{A(r_k)}{kT}\right\}, \quad (2.14)$$

где $\eta(r_k)$ - концентрация комплексов радиуса

$$\eta(r_k) = \eta(r_0) \exp\left\{-\frac{A}{kT}\right\}, \quad (2.15)$$

где $\eta(r_0)$ - концентрация обводнённых ядер радиуса r_0 .

Скорость нуклеации

$$J = n(r_0) \beta(r_k) \exp\left\{-\frac{A}{kT}\right\}, \quad (2.16)$$

Согласно [265] $\beta(r_k) \eta(1) \sim 10^{25} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, значит $\beta(r_k) \sim 10^{25} / \eta(1)$.

Приведём некоторые оценки. При значении пересыщения в облаках $\rho/\rho_\infty = 1,01$ r_k в интервале температур от 10°C до -20°C изменяется от $1,32 \cdot 10^{-5}$ см до $1,82 \cdot 10^{-5}$ см. Это соответствует ~ 400 слоям воды. $A(r_k)/kT = 5,2 * 2,75 * 10^5$ при $T = 10^\circ\text{C}$. $C(r_0/r_k) = 0,12$ при $r_0/r_k = 0$, 79 и 0,0003 при $r_0/r_k = 0,99$. Следовательно, экспонента в (1.7) даже при $r_0/r_k = 0,99$ будет равна

$$\exp\{-5,2 * 10^{-8} * 2,75 * 10^{13} * 3 * 10^{-4}\} \rightarrow \exp\{-435\} \quad (2.17)$$

Таким образом, даже при очень небольших отклонениях $r_0 < r_k$ вероятность образования устойчивых зародышей конденсации пренебрежимо мала.

Для объяснения механизмов взаимодействия ионов с облачной средой обратимся к работам, объясняющим влияние ионов, как источников электростатического поля, на фазовые переходы воды в атмосфере. Представляется целесообразным рассмотреть, в какой степени наличие заряда на образовавшейся частице реагента будет способствовать её росту. Ядра, на которых происходит конденсация в тщательно профильтрованном воздухе, представляют собой легкие ионы [167]. Заряд частицы может быть создан искусственно, например, в результате термической ионизации - термоэлектронной эмиссии с поверхности частицы [108]. Требуется определить поток молекул водяного пара, попадающих на заряженную частицу за счёт их электростатического притяжения частицей.

Для проведения расчётов сформулируем задачу следующим образом. Частица заданного радиуса r_0 несёт заряд q_0 . Каждая молекула водяного пара в локальной системе координат (рис.2.6) представляет собой систему мультиполей с численными значениями, приведёнными выше. Расчёт электрического взаимодействия частицы с молекулой пара проводится для каждой молекулы отдельно. Поэтому система координат, связанная с частицей, без ограничения общности берётся с координатными осями, параллельными осям локальной системы молекулы.

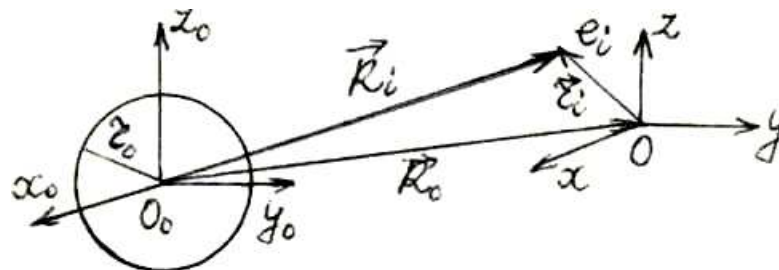


Рисунок.2.6. Система координат, связанная с системой молекулы.

Система координат без индекса "о" относится к молекуле. Вектор \vec{R}_0 соединяет начала координатных систем. Молекула как электрическая система представляется в виде суммы зарядов e_i с вектором $\vec{r}_i (x_i, y_i, z_i)$. Энергия взаимодействия заряда q_0 с суммой зарядов молекулы равна

$$U = q_0 \sum_i \frac{e_i}{|\vec{R}_0 + \vec{r}_i|} \quad (2.18)$$

$$U = U_{01} + U_{02} + U_{03}, \quad (2.19)$$

$$U_{01} = -\frac{q_0}{R_0^2} \cos \vartheta \sum_i e_i z_i = -\frac{q_0}{R_0^2} M_z \cos \vartheta; \quad (2.20)$$

$$U_{02} = \frac{3}{2} \frac{q_0}{R_0^3} (\sin^2 \vartheta \cos^2 \varphi Q_{xx} + \sin^2 \vartheta \sin^2 \varphi Q_{yy} + \cos^2 \varphi Q_{zz}) - \frac{q_0}{2R_0^3} (Q_{xx} + Q_{yy} + Q_{zz}); \quad (2.21)$$

$$U_{03} = -\frac{15}{2} \frac{q_0}{R_0^4} (\sin^2 \vartheta \cos \vartheta \cos^2 \varphi \Omega_{xxz} + \sin^2 \vartheta \cos \vartheta \sin^2 \varphi \Omega_{yyz}) + \frac{3}{2} \frac{q_0}{c} \cos \vartheta (\Omega_{xxz} + \Omega_{yyz}) + \frac{q_0}{6R_0^4} (-15 \cos^3 \vartheta + 9 \cos \vartheta) \Omega_{zzz}, \quad (2.22)$$

где U_{01} - энергия взаимодействия заряд-диполь, U_{02} - заряд- квадруполь, U_{03} – заряд - октуполь. Все взаимодействия определяются расстоянием до молекулы и направлением вектора \mathbf{R}_0 . Все мультиполи, находящиеся в постоянном поле от заряда q_0 из чисто энергетических соображений должны ориентироваться так, чтобы энергия взаимодействия их с этим полем была минимальной. Так дипольный момент ориентируется по направлению поля. Сложнее обстоит дело с квадрупольным и октупольным моментами, не обладающими строгой аксиальной симметрией.

Полный анализ величины потока молекул водяного пара на заряженную частицу будет представлен следующим методом расчёта. Концентрация молекул водяного пара при пересыщении в облаке, равном 1,01 составляет: $3,18 \cdot 10^{17}$ молекул/см³ при $T = 10^\circ\text{C}$, $2,30 \cdot 10^{17}$ молекул/ см³ при $T = 5^\circ\text{C}$ и $0,797 \cdot 10^{17}$ молекул/ см³ при $T = -10^\circ\text{C}$.

Для радиуса частицы $r_0 = 10^{-5}$ см число молекул водяного пара, находящихся в пределах $100r_0$ расстояний от её поверхности, достигает $\sim 10^8$. Сила, действующая на молекулу, равна du/dR_0 , ускорение $a(R_0) = -$

$$\bar{a} = \frac{1}{R_0 - r_0} \int_{R_0}^{r_0} a(R_0) dR_0 \quad (2.23)$$

Среднее время прохождения частицей пути $R_0 - r_0$

$$\bar{t} = \sqrt{\frac{2(R_0 - r_0)}{\bar{a}}} \quad (2.24)$$

Фиксируя расстояние $R_0 - r_0$ - с найденным \mathbf{a} , по (1.13) определяется время, в течение которого молекулы водяного пара в соответствующем объёме придут в соприкосновение с поверхностью частицы, а далее и поток частиц пара, способный увеличить радиус частицы до равновесного значения конденсационного радиуса.

2.7. Механизм образования осадков в облаках

Механизм осадкообразования в облаках был разработан А. Wegener (1911), Т. Bergeron (1935) и W. Findeisen (1937). Теория основана на образовании осадков за счет фазовых переходов воды и гравитационной коагуляции капель. Необходимым условием образования осадков считается возникновение в облаке твердой фазы воды - ледяных кристаллов и дальнейший их рост за счет разности упругости насыщения водяного пара над водой и льдом, которая достигает максимума при $t = -12^{\circ}\text{C}$. В результате роста ледяных кристаллов до размеров, когда они начинают обладать заметной скоростью падения, происходит процесс гравитационной коагуляции, приводящий к укрупнению облачных частиц до размера осадков [12,184]. Сформулированные Вегенером, Берджероном и Финдайзеном теоретические основы образования осадков являются физической основой методов АВ на облачные переохлажденные или смешанные системы, расположенные в зоне отрицательных температур [140].

В меньшей степени разработана теория осадкообразования в теплых и жидкокапельных переохлажденных облаках. Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере теоретически рассмотрена в работе [206]. Результаты самолетного зондирования атмосферы показали, что осадки образуются не только при наличии смешанных слоев облачности с переохлажденными каплями и твердой фазой, но и при наличии жидкокапельных переохлажденных облаков и облаков, расположенных в зоне положительных температур [248]. Н.С.Шишкин отмечает, что образование осадков при чисто водяном состоянии облаков столь же естественно, как и в облаках со смешанной или ледяной фазой. Жидкие осадки в виде переохлажденных капель выпадают и при отрицательной температуре [242], образуя гололед, обледенение проводов и т.п. явления. Выпадение жидких осадков было зафиксировано 30 января из облачности с нижней границей - 0,5 км (температура $-6,4^{\circ}\text{C}$) и верхней границей – 1,8 км (температура $-16,8^{\circ}\text{C}$). Осадки отмечены в полете непосредственно под основанием облака, положительных температур на земле и в воздухе не наблюдалось. Следовательно, твердая фаза в образовании осадков не могла участвовать.

По данным самолетного зондирования [57], в среднем за год осадки выпадают из облаков смешанной фазы - 46%, из водяных облаков - 36%, из чисто ледяных - 18%. Осадкообразующие облака смешанного строения представляют собой чередующиеся слои разной фазы. Летом вероятность осадков из водяных облаков возрастает до 62%, зимой уменьшается до 26%. Это подтверждает гипотезу о многообразии механизмов осадкообразования, но оставляет ряд вопросов, которые еще не достаточно исследованы и изучены, в частности, процессы нуклеации, т.е. процессы конденсации и замерзания, а также коагуляции и осаждения капель при отрицательной температуре.

В классической работе Т. Bergeron (1935) рассматривал следующие факторы осадкообразования: 1) электрические силы притяжения

разноименно заряженных облачных капель или капель с индуцированными зарядами в электрическом поле земли; 2) гидродинамические силы; 3) различие капиллярных и гигроскопических сил на поверхности капель; 4) разность температур между теплыми и холодными каплями; 5) действие турбулентности. Однако, Т. Бержерон пришел к выводу, что перечисленные механизмы не являются эффективными в осадкообразовании [173].

Экспериментальные исследования, проведенные разными авторами [73,174,248], показали, что влияние электрических сил на коагуляцию капель является существенным. Опыты Н.А. Вагера [28] по осаждению искусственного тумана заряженными каплями воды выявили существование положительного эффекта. Искусственный туман в камере мог сохраняться более 2 ч, при воздействии наэлектризованными мелкими каплями воды происходило быстрое изменение его прозрачности. Плотность отрицательных зарядов капель воды была $\sim 2,5 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг, положительных $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг. При рассмотрении роста облачных капель в указанном диапазоне размеров В.М. Мучник [173] сделал вывод о том, что следует учитывать заряды капель. Движение частиц в облаке происходит под действием силы тяжести, силы трения, кулоновской силы электростатического взаимодействия, силы электрического поля поляризации капли под действием электрического поля земли, силы притяжения в результате индукции разноименных зарядов.

Измерения зарядов облачных частиц непосредственно в облаках показали, что 90% всех капель являются заряженными [171]. К образованию электрических зарядов на облачных частицах приводят процессы адсорбции ионов, фазовые переходы воды, разрушение частиц и др. факторы. В атмосфере, как было показано выше, всегда присутствуют ионы обоих знаков, так как ионообразование происходит непрерывно. На основании экспериментального изучения эффективности соударения незаряженных близких по размерам капель можно считать, что столкновения чаще являются упругими и не приводят к слиянию [173]. Наличие электрического заряда,

уменьшая поверхностное натяжение, способствует образованию соединительного канала между каплями. Образование соединительного канала происходит при потенциале, подаваемом на каплю меньше 10 В. Подобные потенциалы соответствуют зарядам облачных и дождевых капель. Заряд мелких облачных капель меньше 10^{-15} Кл; заряды крупных капель в среднем 10^{-8} - 10^{-7} Кл. Для капель радиусом 10 мкм предельный заряд равен $\sim 3 \cdot 10^{-14}$ К. По заключению И.М. Имянитова [72], эффективность слияния столкнувшихся капель существенно зависит от напряженности электрического поля и от величины зарядов на каплях. Лабораторные измерения показывают, что изменение напряженности поля от 0 до 15 В/см увеличивает эффективность слияния крупных капель более, чем в три раза. Напряженность поля в кучевых облаках чаще всего 1-5 В/см [173,208].

Теоретическим путем в работе [157,158,275] показано, что заряды капель оказывают влияние на их коагуляцию в интервале размеров менее 30 мкм. Из расчетов следует, что в случае разноименных зарядов капель коагуляция усиливается за счет сил электрического взаимодействия. При наличии заряда на большой капле и отсутствии его на меньшей, коагуляции способствует образование на меньшей капле индуцированного заряда. При столкновении капель достаточно больших размеров роль электрических сил значительно возрастает, в результате слияние капель становится более эффективным.

Многообразие механизмов электризации имеет различную значимость в разные периоды роста облака и при разных условиях. Рассмотрим подробнее воздействие водяными каплями на конвективные облака на примере эмпирической модели конвективного облака В.А. Зайцева [62].

2.8. Эмпирическая модель конвективного облака

2.8.1. Образование конвективного облака

Образование внутримассовых кучевых облаков происходит при интенсивных конвективных движениях, возникающих при неустойчивой стратификации в дневное время суток. Существуют различные точки зрения на механизм возникновения и характер конвективных движений в атмосфере. Наиболее распространенными являются представления о каскадном (ярусном) характере развития конвекции или в виде струи. Наблюдения с воздушных судов и с земли показали, что конвективное облако состоит из отдельных потоков, которые имеют форму струи или термика (пузыря). При отсутствии облаков средняя плотность составляет около 40 струй на 1 км^2 или 750 термиков в 1 км^3 [166]. Подъем ненасыщенного объема воздуха (термика) осуществляется по сухой адиабате. Горизонтальный размер поднимающегося объема воздуха около 60-100м, средняя амплитуда пульсаций температуры воздуха $0,15 - 0,2^{\circ}\text{C}$, пересыщение по данным Шишкина Н.С. в восходящем потоке составляет лишь сотые доли процента. Водяной пар, питающий облако, поступает вместе с воздухом через основание облака. Втягивание воздуха в конвективное облако прослеживается ниже уровня основания на расстоянии от нескольких десятков метров до 200-300м. Средние размеры конвективных потоков (L) в облаках растут линейно с высотой:

$$L = 27 + 0,015z, \quad (2.25)$$

где z – высота от основания облака, м.

2.8.2. Рост капель в облаках

Образование и рост капель (кристаллов) в облаках определяется конденсацией (сублимацией) и коагуляцией. Основы теории конденсационного роста и испарения капель были разработаны Максвеллом в 19 веке и с уточнениями Стефана и Срезневского применяются до настоящего времени [206]. Образование капель радиусом до 1-2 мкм при

конденсации водяного пара на ядрах конденсации происходит за доли секунды. За счет конденсации на ядрах при отсутствии других механизмов капли могут вырастать до 5-8 мкм.

Процесс коагуляции капель и кристаллов в облаках состоит из их сближения и слияния. Из всех физических механизмов, приводящих к укрупнению облачных элементов, наибольшее значение имеет гравитационная коагуляция вследствие разности скоростей падения под влиянием силы тяжести или подъема восходящим потоком. Критическое значение радиуса капель, при котором начинается гравитационная коагуляция, составляет 18-20 мкм. Укрупнение капель в диапазоне от 8 до 18-20 мкм зависит от условий развития облачности. К коагуляции кроме гравитации могут привести гидродинамические и электрические силы, турбулентное и броуновское движение воздуха.

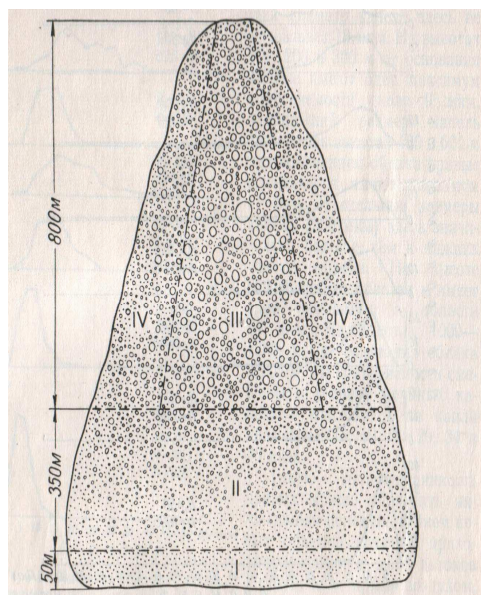
Образование частиц осадков в естественно развивающихся теплых конвективных облаках происходит за время жизни конвективной ячейки 10-30 мин [162]. Неустойчивый размер капли наступает при радиусе 2,5мм. Наблюдения показывают, что капли радиусом больше 2,5-3,2 мм не встречаются – они сплющиваются и разрушаются, образуя большое число более мелких капель [166,168,173]. В лабораторных опытах капли диаметром более 5мм разбрызгиваются за очень малый промежуток времени [166]. Для капель 4,25- 6,25 мм, падающих в спокойном воздухе, число брызг по лабораторным измерениям, колеблется от 3 до 97 (в среднем 30-40). При разбрызгивании образуется несколько капель радиусом около 1 мм и относительно большое число мелких капель. Крупные капли выпадают в виде дождя или ливня, а мелкие поднимаются в восходящем потоке к вершине облака, укрупняясь до критических размеров. Такая цепная реакция может происходить от 3 до 6 раз с постепенным затуханием по мере вымывания водности. Этот процесс происходит по времени до 30 мин. Рассмотрим процесс образования конвективного облака по экспериментальным данным.

На уровне конденсации в поднимающемся воздухе начинается образование облачных капель со средним радиусом 1-2 мкм. С появлением облачных капель возникает перераспределение тепловой энергии по всему объему облачного образования. Основную часть тепла облако получает за счет выделившейся скрытой теплоты конденсации. Прогретый облачный воздух приобретает дополнительную подъемную силу и поднимается до тех пор, охлаждаясь по влажной адиабате, пока вновь будет достигнуто насыщение и произойдет конденсация следующей порции пара на уже существующих каплях. При быстрых изменениях температуры поднимающегося объема воздуха облачные капли практически мгновенно следуют за соответствующей психрометрической температурой воздуха.

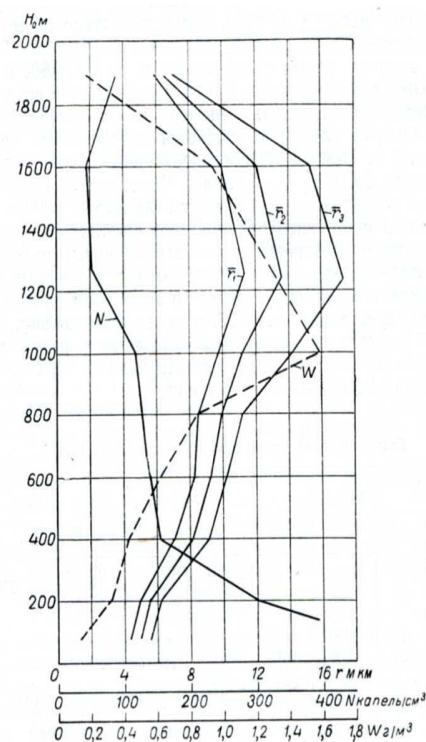
Дополнительное влияние на энергетическое состояние облака оказывает излучение земной поверхности, атмосферы и прямая солнечная радиация. В развивающихся мощных кучевых облаках температура в основании облака на 0,2- 0,3⁰С, а в центральных частях восходящих струй на 2-3⁰С выше средней температуры воздуха вне облаков на той же высоте.

Вертикальные движения внутри облака имеют характер отдельных струй и термиков. По измерениям В.А.Зайцева [62] площадь восходящих струй с вертикальной скоростью ~ 5м/с в различных облаках составляет 20-35% общей площади поперечного сечения средней части облака. Максимальная скорость восходящих потоков в *Cu cong* мощностью 3-4 км достигает 10-11м/с. Нисходящие потоки в этих облаках занимают от 50 до 65% площади преимущественно на периферии облака и имеют скорость около 2м/с, одновременно с этим наблюдаются зоны до 15%, где вертикальные движения практически равны нулю.

Капельная структура конвективного облака на основе экспериментальных данных В.А. Зайцева и обобщенные данные о распределении водности, размерах и числе капель мощного кучевого облака приведены на рис.2.7. [62]. В облаке выделены четыре зоны, наиболее крупные капли расположены в центральной части облака.



а)



б)

Рис. 2.7. а) Схема распределения капель в кучевом облаке; б) Среднее распределение водности (W), размеров (r), и числа капель (N) в *Cu cong* мощностью 2000 м [62].

Зона I у основания облака (~ 50м) относится к уровню конденсации. В этой зоне большинство капель (65%) имеет размеры от 4 до 8 мкм. Капли, образовавшиеся в этой зоне, поднимаются восходящим потоком вверх, а на их месте происходит образование новых капель. В зоне II (~ 50-400м) большинство капель (60%) имеет размеры от 6 до 14 мкм, максимальный диаметр капель не превышает 50 мкм. Зона III, занимающая центральную область облака, расположена в среднем с высоты 400м над основанием облака до его вершины. В этой зоне 60% всех капель имеют диаметр от 8 до 18 мкм, наибольший размер капель 100-300 мкм, отдельные капли достигают 300-400 мкм и более. Присутствие крупных капель в центре конвективного облака свидетельствует о наличии мощных восходящих потоков воздуха.

Зона IV расположена на краях конвективного облака и имеет толщину 50-100м., преобладающие капли 8-14 мкм, крупные капли отсутствуют.

Связи между размерами (r) растущих облачных капель оптимально отражает схема распределения облачных капель Хргиана – Мазина:

$$n(r) = Ar^2 \exp(-br), \quad (2.26)$$

где $A = 1,45\delta r^{-6}\rho^{-1}$, $b = 3r^{-1}$, r - средний радиус капель, δ – водность, ρ – плотность воды. Основная масса облачной воды в континентальных облаках содержится в каплях радиусом от 3-4 до 20-30 мкм. Концентрация таких капель составляет $10^2 - 10^3 \text{ см}^3$ [251].

Результаты измерений температурных пульсаций и вертикальных потоков воздуха в развивающихся конвективных облаках показывают, что на периферии облака и вокруг него формируется тепловая оболочка. Схема тепловой оболочки вокруг кучевого облака представлена в работе [251]. По данным Мазина, знак отклонения температуры в окрестностях облака зависит от того, какой процесс превалирует – охлаждение из-за испарения капель или адиабатическое нагревание воздуха в нисходящих потоках. Наличие тепловой оболочки указывает на то, что в облаке температура воздуха должна быть несколько холоднее, чем вне облака, так как подъем объемов воздуха в облаке (охлаждение) происходит преимущественно по влажной адиабате, а опускание вокруг облака (нагревание) по сухой адиабате. На уровне 1-2 км над основанием в облаке практически отсутствуют участки, где температура ниже температуры окружающей среды. По экспериментальным данным [162], у развивающихся мощных кучевых облаков средний перегрев составляет $\Delta T = 0,7^\circ\text{C}$. Максимальный нагрев и охлаждение наблюдаются в верхней части облака и составляют $+1,66$ и $-3,32^\circ\text{C}$ соответственно. Температура оболочки около основания облака на $0,3-0,5^\circ\text{C}$ выше средней температуры воздуха межоблачного пространства. У средней части облака и его вершины тепловая оболочка имеет толщину 100 - 700 м и перегрев до $1 - 3^\circ\text{C}$ по сравнению со средней температурой воздуха вне облаков на данном уровне. Нисходящие движения имеют турбулентный характер и наблюдаются со средней скоростью около

2м/с. Диапазон изменений температуры также формируется под влиянием турбулентного обмена.

Эмпирическая модель конвективного облака будет не полной, если не учесть ряд других факторов – турбулентность, электрические заряды и др. Распределение средних значений коэффициента турбулентности в $Cu\ congesta$ приведено в работе [251].

2.8.3. Стадия зрелого облака или стабилизации

По классификации Cb различаются на одначейковые, многочейковые и суперчейковые. Стадией зрелого конвективного облака Cb [251] считается начало оледенения его вершины. Эволюция мощных кучевых в кучево-дождевые состоит в появлении ледяных кристаллов в вершине облака, что сопровождается потерей резкости очертаний вершин, приобретающих волокнистую или полосатую структуру. Во время замерзания облачных капель происходит дополнительное выделение скрытой теплоты замерзания, приводящее к развитию вершины облака и к образованию над облаком теплых зон. Теплые участки с превышением температуры воздуха на $3-4^{\circ}C$ и более наблюдаются над облаком до 200-300 м и более, а их горизонтальная протяженность составляет несколько километров.

Вертикальные движения внутри облака имеют характер отдельных восходящих и нисходящих струй чередующихся в горизонтальной плоскости. Естественным следствием восходящих струй воздуха в системе облака являются компенсационные нисходящие движения. Скорость вертикальных потоков изменяется в широких пределах: от долей до 30 – 40 м/с (в Cb). По данным самолетных измерений в США [166], наибольшая повторяемость восходящих и нисходящих струй на всех высотах приходится на интервал скоростей 3,05 – 6,10 м/с, с увеличением высоты вертикальная скорость восходящих движений увеличивается. Количество нисходящих струй в облаке в 2-3 раза меньше, чем восходящих, с увеличением высоты количество нисходящих струй уменьшается. Интервал изменения скоростей

нисходящих струй более узок, чем восходящих. Средний диаметр восходящих потоков 1,5км, а нисходящих 1,2км.

2.8.4. Стадия диссипации

Распад конвективных облаков может происходить в различное время дня, но в основном происходит во второй половине дня при уменьшении солнечной радиации, натекании перистой облачности, вследствие перемещения облака с одной подстилающей поверхности на другую с недостаточным питанием облака водяным паром.

Распад облака сопровождается сильными нисходящими потоками в течение короткого времени. Н.С. Шишкин показал, что распад мощного кучевого облака высотой 4000м может происходить за время от 3 до 6 мин, при этом испарение капель и распад облака идет по всему объему [248].

2.8.5. Электрическое состояние конвективных облаков

Электрическое состояние облаков обусловлено зарядами отдельных облачных элементов и распределением зарядов внутри облака. Электрическая структура конвективных облаков выявлена в результате экспериментальных наблюдений и измерений[40,41,56,73,171,180,208 и др.]. Конвективное облако в стадии зарождения и на стадии *Cu hum- Cu med* обычно заряжено целиком положительно. Заряды противоположного знака расположены в окружающей атмосфере[232]. В стадии *Cu cong* вверху облака накапливается положительный заряд, внизу – отрицательный. Эта структура сохраняется и при переходе облака в кучево-дождевое. С распадом облака упорядоченная структура зарядов размывается [32,73].

Заряд отдельных облачных капель в основном обусловлен свойством воды избирательно захватывать из воздуха отрицательные ионы[88]. Облачная капля может изменить полученный заряд также и под влиянием электрического поля, образовавшегося внутри облака[98]. В восходящих потоках влажного воздуха наряду с незаряженными ядрами всегда

присутствуют положительно и отрицательно заряженные ядра. На любых из них может происходить конденсация влаги. Дж. Таунсенд и Ч. Вильсон разными экспериментальными методами установили, что конденсация влаги в воздухе на отрицательно заряженных ядрах начинается при меньшем перенасыщении водяного пара, чем на положительно заряженных или нейтральных ядрах [157]. Теоретическое объяснение этого явления было дано А.И. Русановым [158]. Он показал, что в случае полярных жидкостей (вода – полярная жидкость) коэффициент поверхностного натяжения воды зависит, как от величины, так и от знака заряда ядра конденсации. Для отрицательно заряженных ядер величина этого коэффициента значительно меньше, чем для положительно заряженных. Поэтому, вероятность возникновения отрицательно заряженных зародышей капель выше, чем положительно заряженных.

При перенасыщении пара ~1% вероятность возникновения отрицательно заряженных зародышей капель на 3 - 4 порядка больше, чем положительных или отношение концентраций этих зародышей $\sim(10^3 - 10^4)$. Это означает, что в случае небольшого перенасыщения в атмосфере, конденсационная активность отрицательно заряженных ядер на порядки выше, чем положительных, так как конденсация происходит преимущественно на отрицательно заряженных ядрах [158].

Как только в поднимающемся из приземного слоя воздухе появляется перенасыщенный пар, начинается процесс образования облака – конденсация влаги и быстрый рост капель, происходящий преимущественно на отрицательно заряженных ядрах. В процессе конденсации капли растут до размеров (1-2) мкм. Далее их рост происходит за счет других факторов [166,168]. Под действием сил тяготения движение капель вверх сильно замедляется. В свою очередь, на положительно заряженных ядрах, процесс конденсации замедлен (для этого требуется значительно большая степень перенасыщения пара, наблюдающаяся на значительно больших высотах), и эти ядра продолжают движение вверх вместе с восходящим потоком. В

результате в облаке происходит макромасштабное пространственное разделение зарядов с образованием отрицательного объемного заряда внизу и положительного наверху [60].

Заряд мелких облачных капель меньше 10^{-5} эл. ст. ед., заряды крупных капель в среднем 10^{-3} - 10^{-2} эл. ст. ед., в грозовых облаках – несколько десятков эл. ст. ед. Напряженность поля в кучевых облаках чаще всего 1- 5 В*см⁻¹. Средние значения напряженности поля растут с вертикальным развитием облака и в грозовых облаках могут достигать 1- 3 кВ*см⁻¹. [171, 173, 204 и др.]

Для Северо-Западного региона измерения напряженности проводились А.А.Синькевичем [208]. Напряженность электрического поля в Cu med изменялась от 90 до 600 В/м при среднем значении 240-260 В/м, в Cu cong и Сб средняя напряженность электрического составляла в стадии развития около 2 кВ/м, а стадии стабилизации и диссипации 16-20 кВ/м. В 96% случаев напряженность электрического поля принимала положительные значения, что указывает на наличие положительного заряда в верхней части облака. Серия измерений напряженности электрического поля в окрестности конвективных облаков в Сибири в пожароопасный период была выполнена Ю.П. Суминым и Я. М. Шварцем [232]. Результаты измерений показали, что в континентальных облаках напряженности электрического поля значительно ниже в пределах 10-70 В/м в Cu med и от -30 до 50 В/м в Cu cong.

2.9. Физические основы засева облаков

Возможность искусственного регулирования осадков основывается на неустойчивых состояниях водной субстанции в атмосфере и конвективной или термической неустойчивости воздушных масс. К неустойчивым состояниям водной субстанции относятся: коллоидная неустойчивость (существование капель воды плотностью 10^3 кг/ м³ в атмосфере с плотностью ~ 1 кг/м³) и фазовая неустойчивость водной субстанции, выражающаяся в метастабильном состоянии капель воды при отрицательной температуре.

Конвективная неустойчивость воздушных масс наблюдается при вертикальных градиентах температуры равных или более сухоадиабатических, возникающих преимущественно в летнее время при дневном прогреве земной поверхности или конденсации водяного пара, связанной с охлаждением восходящего воздуха при конвективной неустойчивости. Потенциальная температура нижележащего слоя растет быстрее, чем вышележащего, т.е. неустойчивость будет возрастать.

При коллоидной устойчивости осадки из облака не выпадают. Это свидетельствует о том, что облако состоит из мелких капель, удерживающихся в атмосфере. Облачные капли диаметром 1-30 мкм удерживаются в атмосфере в результате действия стоксовских сил. Согласно [158] существует критическое число Стокса ($K_{кр} = 1,21$), для которого процесс инерционного осаждения капель на сфере, обтекаемой вязким потоком, не происходит. При броуновской и турбулентной диффузии слияние капель возможно, но считается, что коагуляция, вызванная этими эффектами незначительна.

При коллоидной неустойчивости часть облачных элементов укрупняется и выпадает в виде осадков [159]. Процесс искусственного регулирования осадков (вызывания или предотвращения выпадения) заключается в преобразовании осадкообразующего механизма таким образом, чтобы из коллоидно-устойчивой облачной системы образовать коллоидно-неустойчивую систему. Время существования конвективной ячейки порядка 30 мин. Следовательно, задача ИВО из «теплых» облаков с целью получения дополнительных осадков должна быть решена в течение этого времени.

Набор реагентов для искусственного вызывания осадков из теплых облаков весьма ограничен. Он сводится к гигроскопическим веществам и водному аэрозолю.

Наиболее простым способом изменения спектра размеров капель конвективного облака служит введение в него капель воды. Лучшим уровнем

для ввода является нижняя граница облака, так как считается, что в этом случае капли могут переноситься восходящими потоками в верхнюю часть облака, вырастая до размеров достаточных для выпадения осадков. Образовавшаяся в основании облака капля будет теплее, чем окружающая ее температура вследствие выделения теплоты конденсации водяного пара. Поднимаясь с восходящим потоком, теплая капля будет попадать в более холодную среду с облачными каплями и более низкой температурой. При этом неизбежно будет происходить частичное или полное испарение поднимающейся капли с затратами тепла на испарение. Одновременно с этим в связи с увеличением пересыщения водяным паром на более высоком уровне от основания облака будет наблюдаться рост более холодных облачных капель на этом уровне. Однако этот каскадный процесс требует дальнейшего изучения.

Ориентировочная длительность существования фаз в облаке следующая: фаза развития - от 10 до 15 мин, фаза стабилизации - от 15 до 30 мин, фаза диссипации - от 6 до 30 мин [248].

Рассмотрим процесс воздействия каплями воды с целью ИВО на примере статистического облака В.А.Зайцева, параметры которого были приведены на рис.2.7. Воздействие водным аэрозолем является экономически выгодным, так как это самый дешевый, экологически безопасный, простой в применения реагент, по эффективности не уступающий традиционным гигроскопическим реагентам. Засев облака каплями воды с верхнего основания может привести и к одноразовому осаднению облачной влаги и к цепной реакции образования ливня, и к диссипации облака. Успешный засев будет зависеть от мощности облака, температуры его нижнего основания, вертикальных токов в облаке, водности облака, электрических характеристик атмосферы и облака. Так как эти параметры заранее неизвестны, то ориентировочные данные могут быть получены в результате численных и натуральных экспериментов.

Неустойчивый размер капли наступает при радиусе 2,5 мм. Капли диаметром более 5 мм разбрызгиваются за очень малый промежуток времени [10]. Для капель 4,25 - 6,25 мм, падающих в спокойном воздухе, число брызг по лабораторным измерениям, колебалось от 3 до 97 (в среднем 30-40). При разбрызгивании образуется несколько капель радиусом около 1 мм и относительно большое число мелких капель. Крупные капли выпадут в виде ливня, а мелкие будут подниматься в восходящем потоке к вершине облака, укрупняясь до критических размеров. Такая цепная реакция может происходить от 3 до 6 раз с постепенным затуханием по мере вымывания водности. Этот процесс займет время порядка 30 мин.

Засев растущего конвективного облака каплями воды порядка 3 мм с верхней границы облака уже может вызвать баллоэлектрический эффект и дополнительное увеличение количества осадков. Число дождевых капель при этом увеличивается примерно в 10 раз за каждые 3 минуты, т.е. за время, которое требуется для роста капель за счет коагуляции до неустойчивого размера и выпадения в виде осадков. В таких облаках этот процесс может иметь наибольшее значение, делая процесс образования осадков менее зависимым от их микрофизических свойств. Способ и устройство для искусственного вызывания осадков водным аэрозолем предложены в заявке на патент [137].

2.10. Применения самолетов-танкеров для искусственного вызывания осадков водным аэрозолем

Как уже отмечалось выше, мощные кучевые теплые облака на стадии развития представляют собой коллоидно-устойчивую систему. Процесс перехода мощных кучевых облаков из состояния коллоидно-устойчивых систем в коллоидно-неустойчивые может происходить естественным путем или искусственно вызванным. По данным самолетного зондирования, осадкообразующий механизм в этих облаках может сформироваться при

достижении верхней границей облака как положительных, так и отрицательных температур [246]. Для вызывания осадков из теплых конвективных облаков необходимо стимулировать рост облачных капель до размера выпадающих осадков. Самый простой метод изменения спектра размеров капель конвективного облака заключается в введении в него капель воды.

Рассмотрим процесс воздействия на теплое *Cu cong* на примере стационарной эмпирической модели без учета электрических сил, турбулентности и других факторов. Эмпирическая модель мощного конвективного облака, состоящая из 4 зон, составлена В.А.Зайцевым и дополнена другими экспериментаторами [209,251]. В основании облака расположена зона I, занимающая слой толщиной 50 м, в которой преобладают капли размером 4-8 мкм, пересыщение водяным паром составляет 0,4%. Зона II располагается в слое 50-400 м над основанием облака с размерами капель от 6 до 14 мкм, зона III – от 400м до вершины облака с преобладающим размером капель 8-18мкм. Согласно П.А.Молчанову и Е.С.Селезневой, развитие конвекции имеет ярусный характер. И.Лэнгмюр указывал на цепной процесс осаждения конвективных облаков [166].

По модели Зайцева, концентрация капель с высотой уменьшается от 400 см^3 в зоне I до 50 см^3 в зоне III. Если образовавшиеся капли в зоне I увлекаются восходящим потоком, что естественно, то следует предположить, что поднимающиеся капли испаряются, так как поднимающаяся частица на любой высоте имеет более высокую температуру, чем окружающий воздух, и движется вверх ускоренно. Следовательно, укрупнение капель в растущем облаке происходит поэтапно за счет интенсивной конденсации при перегонке водяного пара испаряющегося с теплых капель, поступающих с нижних уровней на вновь образовавшиеся, частично испарившихся или вовсе не испарившихся на краях поднимающегося термика на более высоком уровне.

Скорость диффузионного испарения и конденсации по Максвеллу определяется долями секунды. Поэтапный процесс распространяется до уровня свободной конвекции, определяемого энергией неустойчивости. Но, так как максимальная влажность находится несколько выше средней части облака, то выше этой границы процесс замедляется и становится менее интенсивным. По данным о влажности и количестве капель нетрудно рассчитать средний арифметический радиус капель. На высоте 1000м от основания облака $r_{cp} = 14,5 \text{ мкм}$, на высоте 1600м - 16.3мкм. В зоне III отдельные капли достигают радиуса 18-20 мкм, приводящего к началу гравитационной коагуляции укрупнения капель. Из приведенных данных следует, что засев облака с нижней границы целесообразен при мощности облака не менее 1500м. Процесс роста мощного кучевого облака составляет 8-10 мин. Средняя скорость вертикальных движений при этом должна быть около 3м/с.

На стадии стабилизации появляются нисходящие движения, обусловленные гравитационным осаждением коллектива капель. В качестве критерия возможности образования осадков по Ф.А.Ладламу требуется наличие в верхней части облака капель радиусом более 150 мкм. Капли, достигшие размера 2,5-5 мм, разбрызгиваются на менее крупные (около 1мм) и большое число мелких. Крупные капли выпадают в виде осадков, а самые мелкие поднимаются в восходящем потоке к вершине облака. Процесс «осаждение - подъем» может продолжаться до определенного вымывания влажности, не обеспечивающей дальнейшее укрупнение капель до размера осадков [243].

Исходя из изложенного, введение водного аэрозоля в размере капель 5-10 мкм целесообразно вводить на границе зон I и II при температуре капель, несколько превышающей температуру окружающего воздуха на высоте ввода. Ввод капель на верхней границе облака должен соответствовать началу гравитационной коагуляции, рекомендованный размер 150 мкм. В идеальном случае для укрупнения капли до 2,5 мм за счет коагуляции

потребуется слияние с 1,3- 1,5 миллиона капель радиусом 15мкм. Для экспериментальной модели В.А. Зайцева это может произойти на высоте ниже 700-800м верхнего основания облака на уровне максимальной влажности. Следовательно, осадки могут быть вызваны водным аэрозолем с верхней границы облака при мощности облака 1600 м и более.

Количество реагента ориентировочно может быть рассчитано численными методами, а установлено экспериментально. Для более полного учета других факторов необходима эмпирическая нестационарная модель развития $Cu\ cong$, построенная по результатам экспериментальных исследований.

Для обработки лесонасаждений против вредных лесных насекомых и болезней широко применяется авиационное опрыскивание с самолетов. Для тушения лесных пожаров широко используются самолеты-танкеры. Эти же самолеты можно использовать для ИВО путем засева каплями воды восходящего потока под облаком или при засеве облака с верхней границы. Работы по искусственному вызыванию осадков в целях борьбы с лесными пожарами проводились с использованием самолетов-танкеров Ан-2п, снабженных водосливными устройствами типа ВСУ-5[114], способными нести на борту до одной тонны воды. В настоящее время предпринимаются попытки модернизировать самолеты Ан-2, количество которых на стоянках составляет около 3000. Оборудование самолетов Ан-2п, Ан-32п, Бе-200п [258] струйными форсунками позволит распылять капли воды в облачной атмосфере в любом количестве в зависимости от метеорологических условий.

В полете над обслуживаемой территорией летчик-наблюдатель, принимая решение о проведении ИВО из конвективных облаков (далее - облака), руководствуется визуальными наблюдениями. В ясную или малооблачную погоду над крупными очагами пожаров образуется конвективная колонка темно-серого цвета, над которой, как правило, наблюдается конвективное облако. Если очаг пожара находится в зоне

дивергенции воздушных потоков (наиболее благоприятные условия для развития восходящих движений), то конвективная колонка достигает большой высоты (до 5 км), и ее засев реагентом может привести к образованию ливневых осадков. Если дым от конвективной колонки растекается во все стороны, образуя вершину в виде шляпки гриба, то конвективная колонка расположена в зоне нисходящих атмосферных потоков (конвергенции), неблагоприятных для развития конвективной облачности и выпадения осадков. Засев реагентом конвективного облака в зоне изотермии или инверсии не всегда целесообразен, так как запас кинетической энергии атмосферы недостаточен, чтобы можно было пробить устойчивой слой инверсии и вызвать осадки [8, 225, 251].

Засев конвективных облаков всегда целесообразно проводить в период максимального развития конвекции, что отмечается, как правило, от 14 до 17 ч по местному времени [116]. В качестве объекта для воздействия выбирают отдельные конвективные облака или ряды конвективных облаков,двигающиеся с наветренной стороны в сторону пожара и удовлетворяющие следующим требованиям [121]:

- вертикальная мощность облака не менее 2 км;
- диаметр основания облака не менее 3 км;
- облако находится в стадии развития, о чем свидетельствует наличие восходящих потоков под облаком (втягивание ВС в облако);
- расчет рубежа воздействия (расстояние до пожара) определяют экспериментально с учетом направления и скорости переноса облаков, определяемых по наблюдениям с ВС или иным способом с учетом времени от воздействия до начала выпадения осадков.

Расход капель воды и их размер должны быть определены экспериментально при проведении профилактических работ по снижению индекса засушливости (класса пожарной опасности лесов) в зависимости от мощности облака, скорости восходящих токов, температуры воздуха,

относительной влажности и др. параметров. При этом исходят из того, что вводимые частицы (водный аэрозоль) могут расти в облаке за счет тех же факторов, что и облачные капли, т.е. за счет конденсации и коагуляции. Выбор начальных размеров вводимых частиц должен производиться с учетом имеющегося в облаке спектра капель. Вводимые частицы должны иметь размеры, большие, чем r_m - радиус облачных капель, соответствующий максимуму в спектре водности на данной высоте. Типичный размер капель в облаке у нижней границы 5-10 мкм. Вследствие этого за время подъема от уровня образования капель до верхней границы конвективного облака, только малая часть облачных капель успевает укрупниться до размера дождевых капель (типичные размеры 500-1000 мкм). Поэтому целесообразно производить засев частицами относительно больших размеров (радиус r_0 , равен 5- 100 мкм).

Срок существования капли зависит от начального диаметра капли и скорости испарения. Поскольку скорость оседания для различных частиц различна, то и время существования частиц в облаке при подъеме воздушным потоком или падении их с одной и той же высоты будет разное. Крупные частицы, падающие с большой скоростью, располагаются по линии полета, а мелкие разносятся в разные стороны, потому что они падают медленнее и дольше остаются в воздухе во взвешенном состоянии. Часть же оледеневших твердых частиц, также, как и капель жидкости из-за малой скорости их оседания и турбулентного состояния воздуха относится на большое расстояние от линии полета, увеличивая размеры зоны засева.

Капли с диаметром от 10 до 300 мкм могут находиться в воздухе в широких пределах, засевая облачность от нескольких секунд до двух часов и более, поддерживая этим цепной процесс искусственного образования осадков.

Для искусственного регулирования осадков необходимо иметь представление о температурном режиме облачности, стадии развития (образование, стабилизация, диссипация), фазовом состоянии

(жидкокапельное, кристаллическое, смешанное) и о механизме осадкообразования различных осадкообразующих облаков. Это подтверждает гипотезу о многообразии механизмов осадкообразования, воздействия на которые проводят с учетом высоты верхней границы облака ($H_{вг.}$), мощности облака (ΔH), вертикальной скорости воздуха (W) и размера частиц реагента (r_0).

Существует оптимальное количество вводимого реагента, дальнейшее увеличение которого приводит к относительно меньшему увеличению количества осадков. Далее, из рис. 2.8 видно, что до тех пор, пока увеличение концентрации практически не влияет на рост капель, наблюдается линейная зависимость количества осадков Q от концентрации вводимых частиц N , затем происходит замедление роста Q при увеличении N .

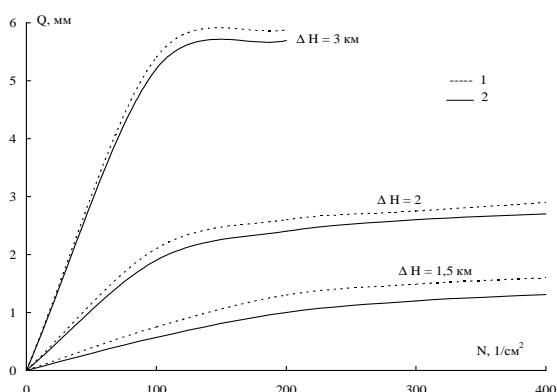


Рисунок 2.8. Зависимость количества осадков (Q мм) от концентрации вводимых частиц (N) при различных начальных условиях (r_0 и ΔH), 1 r_0 – 30 мкм; 2 - r_0 – 100 мкм[218].

Если построить график зависимости Q на единицу массы реагента от концентрации реагента N , можно заметить, что точка N_0 соответствует оптимальной концентрации. Результаты вычислений оптимальной концентрации частиц N_0 , $см^{-2}$, соответствующего ей Q , мм, и конечного радиуса капель r_k , мкм, в зависимости от условий воздействия (вертикальных токов на нижней границе, мощности облака и размеров, вводимых в облако капель воды) приведены в табл. 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3

Количество осадков (Q) и размер выпадающих капель (r_k) в зависимости от мощности облака (ΔH) и размера засеваемых капель (r_0)

ΔH , м	r_0 , МКМ					
	30		60		100	
	Q , мм	r_k , МКМ	Q , мм	r_k , МКМ	Q , мм	r_k , МКМ
1500	1,0	480	1,1	510	1,1	540
2000	1,4	805	1,5	825	1,6	855
3000	2,7	1590	2,8	1620	2,9	1670
4000	4,2	2615	4,2	2640	4,2	2670

Из данных табл. 2.3 следует, что количество осадков Q , соответствующее оптимальной концентрации, зависит от мощности облака (ΔH) и вводимого реагента (r_0).

Из данных табл. 2.3 и 2.4 следует, что количество осадков Q , соответствующее оптимальной концентрации, зависит от высоты введения реагента и скорости восходящего потока w , м/с, начальный размер частиц мало сказывается на количестве выпадающих осадков.

При проведении практических работ целесообразно перейти от оптимального размера частиц к оптимальному количеству реагента M , приходящемуся на единицу площади. Рис.2.9. показывает зависимость M от высоты $H_{в.г}$ и r_0 . Расчет M сделан для случая, когда в качестве реагента выбирается вода с удельным весом $\rho_v = 1 \text{ г/см}^3$.

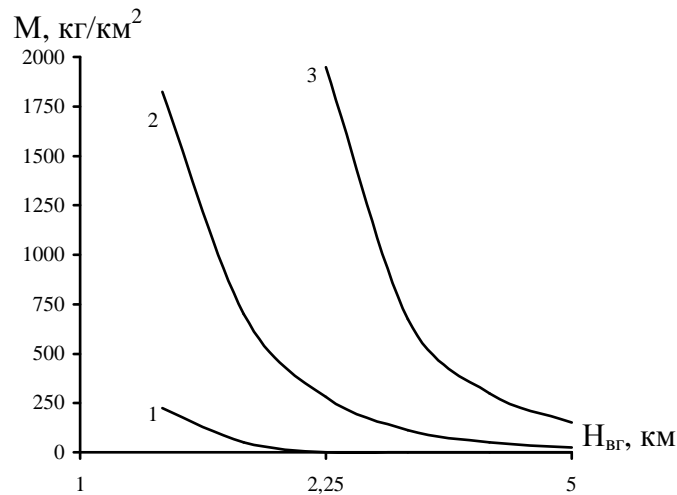


Рисунок 2.9. Зависимость оптимального количества реагента М от H_{BG} и r_0 (1 - $r_0 = 30$ мкм, 2 - $r_0 = 60$ мкм, 3 - $r_0 = 100$) [218].

Таблица 2.4

Количество осадков (Q) в зависимости от мощности облака, вертикальных скоростей и размера реагента (r_0) [218].

W, м/с	$\Delta H,$ м	$r_0,$ мкм								
		30			60			100		
		N_{opt}	Q, мм	$r_k,$ мкм	N_{opt}	Q, мм	$r_k,$ мкм	N_{opt}	Q, мм	$r_k,$ мкм
0,1	1500	135	0,84	520	130	0,86	540	125	0,97	560
0,5	1500	90	1,22	690	95		650	95	1,07	650
	2000	34	1,53	1020	37	1,51	990	37	1,51	990
5,0	1500	2	3,06	3285	4	2,63	2495	-		
	2000	1,8	4,3	3650	3	2,9	2900	-		

Вычисление коэффициента использования облачной влаги (ν), который представляет собой отношение количества выпавших осадков к общему влагозапасу в облаке, показало, что он в среднем равен 60-65 %. Расчетные данные времени выпадения осадков после начала воздействия, полученные численным интегрированием, показали, что по порядку величин они хорошо согласуются с данными опытов – время роста частиц, введенных в облако

при воздействии, до размера осадков получилось равным ~7-10 мин (рис. 2.10). Это практически в два раза меньше, чем время роста частиц осадков при засеивании облака твердой углекислотой. Анализ результатов расчета позволяет сделать практические выводы. Если воздействие производится на облако с прекратившимся восходящим потоком, то введение реагента выгоднее всего производить на высоте верхней границы облака.

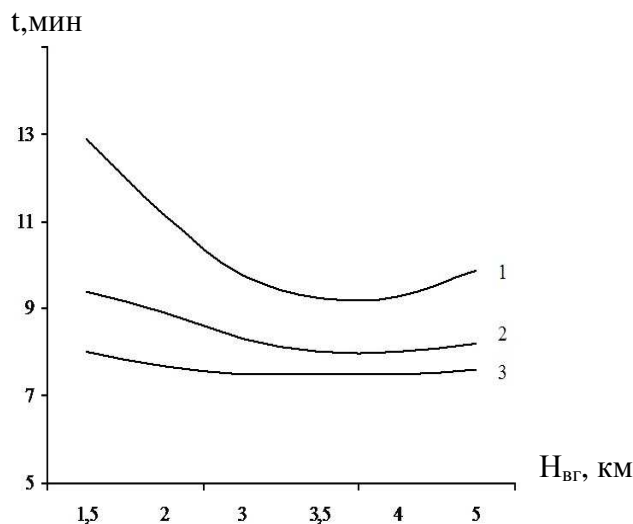


Рисунок 2.10. Время (t, мин) образования осадков в зависимости от условий воздействия (r_0 , $H_{вг}$), 1 - $r_0 = 30$ мкм, 2 - $r_0 = 60$ мкм, 3 - $r_0 = 100$ мкм[218].

В процессе существования облака выделяют три этапа – образование, стабилизация и диссипация облака в результате естественного испарения облачных частиц. Из этого следует, что, при интенсификации первого процесса происходит выпадение осадков, а при стимуляции второго – распад облака. Для решения задачи ИВО рассмотрим ряд вопросов, связанных с естественной эволюцией конвективного облака.

В случае восходящего потока целесообразно введение реагента под нижней границей облака. При воздействии реагентами такого рода необходимо выбирать частицы с радиусом, лишь несколько большим величины медианного радиуса облачных частиц (r_m) на высоте ввода реагента. Такой вывод основан на том факте, что увеличение размера частиц

реагента r_0 не дает значительного увеличения количества осадков, но общее количество расходуемого реагента при этом сильно возрастает.

Если в облаке существуют восходящие потоки в момент воздействия, то частицы с небольшими размерами выгоднее использовать еще и потому, что они поднимаются восходящим потоком на значительные высоты, за счет чего вырастают до больших конечных размеров.

При температуре -35°C жидкокапельная фаза может существовать 1-2 с при влажности не превышающей $0,001 \text{ г/м}^3$, при больших значениях влажности ($0,01-0,05 \text{ г/м}^3$) время замерзания составляет 5-10 с. Мелкие капли, способные существовать при низких температурах, могут служить источником образования облачных кристаллов. Диапазон размеров ледяных кристаллов в перистых облаках весьма широк. По данным измерений кристаллы в виде столбиков могут иметь размеры от нескольких микрон до 2 мм и более. Средняя скорость выпадения кристаллов, составляет 1 м/с . Количество облачных частиц также изменяется в широких пределах от $10^5/\text{м}^3$ до $10^7/\text{м}^3$. Засев водным аэрозолем облачности верхнего яруса приведет к выпадению кристаллов в нижележащие слои облаков, стимулируя осадкообразующий механизм и, соответственно, выпадение осадков.

Искусственное вызывание осадков из чисто водяных облаков так же естественно, как и в облаках смешанной и ледяной фазы. Образование частиц осадков в естественно развивающихся конвективных облаках происходит за время жизни конвективной ячейки 10-30 мин. Задача искусственного вызывания осадков из «теплых» облаков возникла с целью получения дополнительных осадков для тушения лесных пожаров, снижения засушливых явлений и класса пожарной опасности лесов.

При наличии конвективной неустойчивости в атмосфере происходит непрерывное развитие мощной конвективной облачности. Определение оптимальной длины линии засева облаков, количества осадков для любых исходных данных о скорости переноса облаков и самолета, высоте верхней границы облаков, мощности облаков ведется на бортовом компьютере.

Известно, что наиболее эффективным процессом роста облачных капель является их рост за счет гравитационной коагуляции, происходящей благодаря различной скорости подъема-падения капель.

Процесс гравитационной коагуляции облачных капель производят при сбросе капель воды в верхнюю часть облака. Для зарождения процесса коагуляции необходимы более крупные капли, которые должны попадать в облако из внешних источников. Радиус вводимых частиц с верхней границы облака при этом должен быть не менее 2 мм, чтобы вызвать процесс их укрупнения за счет гравитационной коагуляции. Неустойчивый размер капли наступает при радиусе 2,5 мм. Капли диаметром более 5мм разбрызгиваются за очень малый промежуток времени. Для капель 4,25-6,25 мм, падающих в спокойном воздухе, число брызг по лабораторным измерениям, колеблется от 3 до 97 (в среднем 30-40). При разбрызгивании образуется несколько капель радиусом около 1мм и относительно большое число мелких капель. Крупные капли выпадают в виде дождя или ливня, а мелкие поднимаются в восходящем потоке к вершине облака, укрупняясь до критических размеров. Такая цепная реакция происходит от 3 до 6 раз с постепенным затуханием по мере вымывания водозапаса облака. Этот процесс занимает около 30 мин.

Наблюдения показывают, что в облачности капли радиусом больше 2,5-3,2 мм не встречаются – они сплющиваются и разрушаются, образуя большое число более мелких капель. В мощном развивающемся конвективном облаке восходящий поток может быть достаточно сильным, чтобы поддерживать таким образом цепную реакцию увеличения числа дождевых капель.

Следовательно, засев растущего конвективного облака каплями воды порядка 2 -3 мм с верхней границы облака может вызывать дополнительное увеличение количества осадков. Число дождевых капель при этом увеличивается примерно в 10 раз за каждые 3 минуты, т.е. за время, которое требуется для роста капель за счет коагуляции до неустойчивого размера и

выпадения в виде осадков. В таких облаках этот процесс может иметь наибольшее значение, делая процесс образования осадков менее зависимым от их микрофизических свойств.

Результаты самолетного зондирования атмосферы показали, что осадки образуются не только при наличии смешанных слоев облачности с переохлажденными каплями и твердой фазой, но и при наличии жидкокапельных переохлажденных облаков, из которых при отрицательных температурах выпадает переохлажденный дождь, образуя гололед, обмерзание проводов, вызывая обрывы линий электропередач и др. опасные явления [57]. Из изложенного выше следует, что в образовании осадков участвуют не только конденсационно-сублимационные процессы и гравитационная коагуляция, но и конденсационно-коагуляционные, которые могут приводить к образованию осадков в переохлажденных облачных системах. Задача предотвращения гололеда состоит в том, чтобы закристаллизовать облачные капли. В этом случае засев облачности производят с верхней границы облаков мелкими каплями воды, замерзающими в течение 1-2 с, вызывая замерзания облачных капель и предотвращение осадков или выпадение твердых осадков в виде снега или крупы на земную поверхность.

Засев мощной конвективной облачности, верхняя граница которой располагается в области отрицательных температур. Экспериментальные данные показывают, что наибольшая водность в облаках наблюдается в верхней части облака, по радиолокационным данным при стационаровании и диссипации облака зона наибольшей водности опускается в нижнюю часть облака.

Засев облака каплями воды производят с нижнего основания или с верхней границы облака. Для осуществления засева облака проводят по самолетным и радиолокационным измерениям определение мощности облака, температуры его границ, вертикальных токов в облаке, водности облака. Так как эти параметры заранее неизвестны, то ориентировочные

данные могут быть получены в результате численных расчетов, которые могут быть уточнены при натурных экспериментах. Экспериментально установлено, что засев мощного конвективного облака на высоте две трети высоты от нижнего основания облака наиболее результативен для искусственного вызывания осадков.

Согласно экспериментальной модели конвективного облака засев целесообразно проводить на высоте 50-100 м над нижним основанием облака мощностью порядка 2000 м каплями 10-15 мкм, при отсутствии эффекта в течение 15-20 мин, необходимо провести засев с верхней части облака каплями 130-150 мкм.

При использовании в качестве реагента капель воды искусственные осадки появляются через 8-15 мин после введения реагента в облако [196].

Количество выпавших осадков, Q , мм, соответствующее определенным начальным условиям r_0 и ΔH (рис.2.8), определяется численным методом по формуле (2.27)

$$Q = \frac{4}{3} \pi \rho_{H_2O} r_k^3 N, \quad (2.27)$$

где ρ_{H_2O} - плотность воды, r_k – радиус капли при выпадении ее из облака, мкм;

N – количество частиц реагента, приходящегося на 1 см^2 площади облака (концентрация вводимых в облако капель воды);

Выводы к Главе 2

В главе рассмотрена возможность использования самолетов – танкеров Бе-12п, Бе-200п, Ил-76п и др. для снижения КПО и ИВО на лесные пожары водным аэрозолем. Оценка возможности использования водного аэрозоля позволяет заключить, что замена используемых в настоящее время реагентов (твердой углекислоты, йодистого серебра и гигроскопических веществ) водным аэрозолем является вполне реальной при АВ на конвективную облачность. Введенные в облачную атмосферу водяные капли адсорбируют атмосферные ионы и электроны, превращаясь в электрически заряженные

частицы, способные эффективно взаимодействовать с облачными каплями. Для искусственного вызывания осадков из мощных кучевых и кучево-дождевых облаков мощностью 1500 м и более предпочтительным является засев вершины облака крупными водяными каплями 3 мм и более для искусственного создания в облаке баллоэлектрического эффекта, вследствие которого в облаке возникает цепной процесс образования осадков.

Наиболее эффективным процессом роста облачных капель является их рост за счет гравитационной коагуляции, происходящей благодаря различной скорости падения капель. Наблюдения показывают, что капли радиусом больше 2,5-3,2 мм не встречаются – они сплющиваются и разрушаются, образуя большое число более мелких капель. В мощном, развивающемся кучевом облаке восходящий поток может быть достаточно сильным, чтобы поддерживать цепную реакцию увеличения числа дождевых капель. Число дождевых капель увеличивается примерно в 10 раз за каждые 3 минуты, т.е. за время, которое требуется для роста капель размером до 1 мм за счет коагуляции капель до размера осадков. В таких облаках этот процесс может иметь наибольшее значение, делая процесс образования осадков менее зависимым от их микрофизических свойств. Введение распылением капель воды в растущее конвективное облако для ИВО целесообразно проводить у границ конвективного облака с использованием струйных форсунок. Форсунки распыляют жидкости до мельчайших капель. Конструкция двухфазной форсунки обеспечивает точный контроль размера капель и их распыление. Оборудование самолетов Ан-2п, Ан-32п, Бе-200п форсунками позволяет распылять капли воды под нижней границей облака в любом количестве в зависимости от метеорологических условий.

Процесс укрупнения облачных капель при восходящих движениях происходит не только за счет перенасыщения водяным паром вследствие вертикального подъема воздушной массы, но и в результате дробления мелких облачных капель при достижении ими заряда, превышающего предел Релея. Приведенная схема конвективного облака, полученная многими

экспериментаторами, подтверждает полученный результат. Количество водяных капель в поднимающейся струе уменьшается на порядок, а их водность на порядок увеличивается при максимальном размере радиуса капель в 15-16 мкм.

Количество выпавших осадков, Q , мм, соответствующее определенным начальным условиям r_0 и ΔH , определяется расчетными методами, согласно которым существует оптимальное количество вводимого реагента, дальнейшее увеличение которого приводит к относительно меньшему увеличению количества осадков. Данные для проведения расчетных методов представлены в виде таблиц и графиков. Приведены рекомендации для выбора высоты засева реагентом: - при восходящих потоках целесообразнее производить засев с нижней границы облака; - при квазистационарном состоянии облака - с верхней границы.

Глава 3. Искусственное вызывание осадков растворами гигроскопических веществ

3.1. Опыты по модификации жидкокапельной фазы воды в паровоздушной среде гигроскопическими веществами

Применение гигроскопических веществ для АВ на облака более эффективно при отрицательной температуре облачной среды, чем обыкновенной воды, так как температура замерзания растворов ниже нуля градусов по Цельсию. Это очевидное преимущество гигроскопических веществ по сравнению с льдообразующими реагентами с пороговой температурой льдообразования ниже -4°C , позволяющее проводить засев облаков в диапазоне температур $0 - -4^{\circ}\text{C}$. Поэтому, исследования возможности применения растворов гигроскопических веществ для вызывания осадков из облаков, основанные на интенсификации конденсационного роста капель раствора, продолжают уже многие годы [23, 33, 54, 55, 221, 266, 279, 283 и др.].

Первые исследования по использованию гигроскопических веществ в качестве реагентов проведены в 30-х годах предшествующего столетия. В результате было установлено, что гигроскопические вещества ускоряют рассеяние тумана и выпадение осадков [218,221]. Однако, несмотря на то, что экспериментов было много, нормы воздействия и способы введения реагентов (количество вещества и размер его частиц) установлены лишь для конвективной облачности при применении поваренной соли (NaCl) [211]. Эксперименты в Калифорнии (США) показали, что туман рассеивается после введения гигроскопических частиц. Наиболее эффективны гигроскопические частицы радиусом 7-10 мкм. При этом отмечалась сильная зависимость рассеяния тумана от радиуса частиц и засоление почвы при использовании NaCl [221].

Результаты засева конвективных облаков гигроскопическими реагентами в виде порошков или растворами гигроскопических веществ приводились в ряде случаев в РФ [23,33,54], Индии [273], Тайланде [282,286,287], Южно-Африканской Республике [261,272,284], Мексике [263] и др. странах. Результаты работ не являются однозначными [281]. Анализ положительных результатов (увеличение количества осадков от 24% над океаном в Индии) позволяет сделать вывод, что воздействия гигроскопическими реагентами приводят к изменению микроструктуры конвективных облаков, продлению времени жизни конвективной ячейки, увеличению мощности и площади облака, а также к интенсификации количества осадков, выпадающих из облаков.

Результаты воздействия на гряды конвективных облаков в Индии на побережье (мощность 0.9-1.2 км, высота нижней границы $H_{н.г.} = 600$ м) и над континентом (мощность 1.2-2.1 км, $H_{н.г.} = 1500$ м) частицами соли количеством 20-30 кг на 3 км полета приведены в [273]. В отдельных случаях после воздействия фиксировалось выпадение осадков. Метеорологический анализ случаев выпадения осадков после воздействия отсутствует. По мнению автора [273], технология введения гигроскопических веществ с

целью создания зародышей осадков в облаках не может считаться совершенной для достижения оптимального эффекта.

Однако с помощью гигроскопических веществ возможно рассеивать туманы, если их толщина превышает 100 м и образовавшиеся капли могут за время падения удалить значительное количество влаги. Воздействия дают оптимальный эффект, если радиус введенных частиц около 10 мкм. Если $r < 7$ мкм, то отмечается перезасев; при $10 \text{ мкм} < r < 25 \text{ мкм}$ частицы выпадают слишком быстро, чтобы удалить необходимое количество влаги. Для существенного увеличения видимости в тумане по расчетам требуется 1-2 г NaCl на 1 м^2 тумана[43].

Механизм АВ гигроскопическими веществами можно описать следующим образом. При введении в облако гигроскопические частицы покрываются пленкой водного раствора. Упругость пара над такой частицей меньше, чем над каплей чистой воды. За счет этого происходит интенсивная конденсация на введенных частицах, уменьшение влажности в облаке и испарение облачных капель, т.е. происходит процесс замещения естественных облачных капель на искусственные. Такими свойствами обладают водные растворы хорошо растворимых в воде веществ, таких как NaCl, CaCl₂, KNO₃, MgCl₂ и др. [167].

Основными факторами, от которых зависит эффективность АВ гигроскопическими веществами, являются: мощность облака, влагосодержание, микрофизические параметры; химический состав, степень дисперсности и концентрация используемого реагента [23, 33, 55]; технология применения реагента (способ диспергирования, уровень засева относительно нижней границы, использование вертикальных токов воздуха и т.д.). Существенную роль при гигроскопическом засеве играет концентрация гигроскопических аэрозолей. При завышенной концентрации по сравнению с оптимальной возможен эффект «перезасева» облака, сопровождающийся не ростом, а уменьшением интенсивности естественных осадков.

Под обоснованием какого-либо способа воздействия на облака (в том числе и гигроскопическим реагентом) имеется в виду установление возможности искусственного образования необходимой концентрации облачных капель радиусом до 15- 20 мкм. Это приводит к гравитационной коагуляции облачных капель, а значит, к их быстрому укрупнению до размеров осадков. Таким образом, теоретические расчеты достаточно было ограничить только начальной стадией конденсационного роста капли на гигроскопическом ядре [78].

Согласно современной теории образования осадков [158, 166, 168, 248 и др.], рост облачных капель в указанном диапазоне радиусов (<15 мкм) не может происходить вследствие гравитационной коагуляции, а определяется лишь конденсацией паров воды. Это связано с существованием критического числа Стокса (1,21) для процесса инерционного обтекания сфер вязким потоком, приводящего к запрету гравитационной коагуляции для капель радиусом менее 15 мкм [158].

Конденсационный рост облачных капель происходит достаточно быстро для мелких капель диаметром менее 1 мкм [166, 168]. Конденсационный рост капель до диаметра 30 мкм и более происходит слишком медленно. Например, при скорости восходящего потока в облаке 10 см/с диаметр капли конденсационным путем растет от 11 мкм до 30 мкм за 7,5 часа, а затем вследствие гравитационной коагуляции он вырастает до 1300 мкм за 15-20 мин [6, 206, 213]. Такая продолжительность образования осадков значительно превосходит фактически наблюдаемые времена образования осадков из облаков. Естественно предположить, что в период от замедленного конденсационного роста капель до начала гравитационной коагуляции на укрупнение действуют электрические заряды капель и атмосферные электрические поля [147, 148, 157]. Именно в силу этих обстоятельств электрическая коагуляция облачных капель может играть существенную роль для развития осадкообразующего механизма на

начальной стадии развития облака, когда гравитационной коагуляции еще нет [159, 249].

Засев гигроскопическими частицами морского происхождения континентальных облаков оказывает сильное влияние на осадки. Для умеренно континентальных облаков получено увеличение количества осадков на 65% и на 109% для резко континентальных, т.е. в районах, где вероятность лесных пожаров наиболее высока. Объясняется это тем, что по мере удаления от морского побережья количество наиболее активных гигроскопических ядер конденсации непрерывно уменьшается до нуля [168].

3.2. Расчетные формулы для конденсационного роста капли на гигроскопическом ядре

Лабораторные эксперименты, описанные в предыдущем разделе, не дают сколько-нибудь убедительного доказательства возможности эффективного применения гигроскопических веществ для воздействия на облака с целью вызывания осадков. Полевые эксперименты показывают положительные результаты, учитывая что количество вводимого реагента было оптимальным.

Обратимся к теоретическому описанию конденсационного роста капли на гигроскопическом ядре, изложенному в работах [6,47,168,202,277 и др.]. Основной характеристикой, предопределяющей интенсивность конденсационного роста капли солевого раствора, является активность воды в растворе a_w .

$$a_w = \frac{p_s}{p_\infty}, \quad (3.1)$$

где p_s и p_∞ - соответственно давление насыщенного водяного пара над плоскими поверхностями раствора и чистой воды. Активность воды в растворе выражается через осмотический коэффициент раствора данного химического состава по формуле (3.2), которая приведена в [277].

$$a_w = \exp\left\{-\frac{\nu\Phi\mu M_w}{1000}\right\}, \quad (3.2)$$

где ν - число ионов, образующихся при диссоциации молекулы указанного вещества в растворе, M_w - молекулярный вес растворителя (в нашем случае воды), μ - моляльность водного раствора – количество молей растворенного вещества в 1000 г воды, Φ -осмотический коэффициент.

Если весовая концентрация раствора равна отношению масс растворенного вещества m_s и растворителя m_w , то его связь с μ будет следующей:

$$c = \frac{m_s}{m_w} = \frac{\mu M_s}{1000}, \quad (3.3)$$

где M_s - молекулярный вес растворимого вещества.

Воспользовавшись экспериментальными данными, которые приведены в [6,83], рассмотрим для некоторых химических составов рассчитанные зависимости активности воды в растворе от концентрации раствора и его температуры.

С целью сопоставления в табл. 3.1 приводятся степени понижения давления насыщенного пара над растворами различных солей, а значит, и эффективности использования той или иной соли в качестве реагента для искусственного создания капель необходимого размера. В табл. 3.4 показана зависимость активности воды в растворе от концентрации этого раствора c в долях α от концентрации насыщенного раствора c_{sat} при $T=25^\circ\text{C}$. Из этой таблицы видно, что понижение давления насыщенного пара над раствором, содержащим Mg, значительно превосходит это понижение для других химических составов [83].

Значения a_w для насыщенных растворов различных солей в интервале температуры от 25°C до -20°C представлены в таблице 3.1. С понижением температуры, уменьшением концентрации насыщенного раствора давление насыщенного водяного пара становится меньше. Особенно заметно уменьшение равновесного давления водяного пара для веществ с низким значением a_w .

Табл. 3.2 содержит значения активности воды в растворе для 12 солей в зависимости от концентрации раствора и соответствующей моляльности раствора. Только раствор хлористого магния выделяется сильным понижением давления насыщенного водяного пара. Остальные растворы понижают давление приблизительно одинаково и значительно слабее.

Таблица 3.1. Зависимость активности воды в растворе a_w от его концентрации c в долях $\alpha = \frac{c}{c_{sat}}$ к насыщенной концентрации раствора c_{sat} , $T=25^\circ\text{C}$.

MgCl_2 , $\rho_s = 1,54 \text{ г/см}^3$, $\nu = 3$ [83]

a_w	0,53	0,56	0,66	0,72	0,76	0,82	0,89	0,90	0,96	0,98
C	0,43	0,39	0,34	0,30	0,26	0,22	0,17	0,13	0,09	0,04
α	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

NaCl , $\rho_s = 2,16 \text{ г/см}^3$, $\nu = 2$

a_w	0,75	0,77	0,81	0,84	0,86	0,88	0,92	0,94	0,96	0,98
C	0,36	0,32	0,29	0,25	0,22	0,18	0,14	0,11	0,07	0,036
α	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

KCl , $\rho_s = 1,99 \text{ г/см}^3$, $\nu = 2$

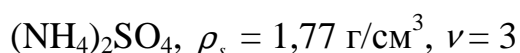
a_w	0,79	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,97	0,99
C	0,45	0,41	0,36	0,32	0,27	0,23	0,18	0,14	0,09	0,045
α	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

NH_4Cl , $\rho_s = 1,53 \text{ г/см}^3$, $\nu = 2$

a_w	0,75	0,77	0,81	0,83	0,86	0,89	0,91	0,93	0,96	0,98
C	0,40	0,36	0,32	0,28	0,24	0,20	0,16	0,12	0,08	0,04
α	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

NaNO_3 , $\rho_s = 2,26 \text{ г/см}^3$, $\nu = 2$

a_w	0,81	0,83	0,85	0,86	0,88	0,91	0,93	0,95	0,97	0,99
C	0,60	0,54	0,48	0,42	0,36	0,30	0,24	0,18	0,12	0,06
α	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1



a_w	0,81	0,83	0,86	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,99
C	0,72	0,65	0,57	0,50	0,43	0,36	0,29	0,22	0,14	0,07
α	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

В порядке иллюстрации эффективности конденсационного роста капли растворов хлористого магния с наибольшим понижением равновесного давления водяного пара и обычно используемого при активных воздействиях хлористого натрия дана таблица 3.3. В этой таблице показана связь между a_w , относительной концентрацией раствора (как доли от насыщенного) и отношением радиусов капли r и сухого ядра r_s . При этом предполагалось, что разбавление раствора при конденсации водяного пара происходит так, что концентрация раствора одинакова во всем объеме капли.

Таблица 3.2. Значения активности воды в растворе a_w в насыщенных растворах различных солей при разных температурах. Верхняя цифра соответствует $T=25^\circ\text{C}$, ниже цифры относятся к $T=20^\circ\text{C}$; $T=0^\circ\text{C}$ и $T=-20^\circ\text{C}$ [83].

Соль	KCl	NH_4Cl	NaCl	KNO_3	NH_4NO_3	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
a_w	0,84	0,77	0,75	0,92	0,62	0,33
	0,86	0,80	0,75-0,77	-	-	-
	0,88	0,81	0,76	0,96	0,78	0,35
	0,96	0,90	0,80	0,99	0,88	0,40
Соль	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	K_2SO_4	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	NaNO_3	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
a_w	0,24	0,974	0,79	0,53	0,73	0,49
	0,40	0,970	0,80	0,56	-	-

Уравнение роста капли за счет конденсации окружающего ее пересыщенного водяного пара приводится многими авторами [206,216 и др.]. Однако при выводе этого уравнения делается много упрощающих предположений, которые требуют обоснований и более строгих оценок.

Дополнительный анализ теории конденсационного роста продиктован тем, что для наших целей требуется рассчитать рост облачной капли на солевом ядре до ее радиуса, не меньшего 20 мкм. Опуская подробный анализ, приведем лишь окончательный вид полученного уравнения для конденсационного роста капли на солевом ядре.

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{(S-1) + [1 - a_w(r, t)]}{\frac{R_v T_\infty \rho_L}{De_{S, \infty}(T_\infty)} + \frac{L \rho_L a_w(r, t)}{T_\infty k} \left(\frac{L}{R_v T_\infty} - 1 \right)} \quad (3.4.)$$

где r - радиус капли, ρ_L - плотность воды, если конденсируется чистый водяной пар, R_v - удельная газовая постоянная водяного пара, D - коэффициент молекулярной диффузии водяного пара, L - удельная скрытая теплота парообразования, k - коэффициент теплопроводности воздуха, T_∞ - температура воздушной среды на достаточно большом удалении от поверхности капли, $e_{S, \infty}(T_\infty)$ - давление насыщенного водяного пара над плоской поверхностью воды при температуре T_∞ , S - относительная влажность воздуха как отношение давления пара к давлению насыщенного пара, $a_w(r, T)$ - активность воды в растворе как функция радиуса капли (концентрации раствора) и температуры.

Таблица 3.3. Значения активности воды в растворе a_w для некоторых солей в зависимости от весовой концентрации c и соответствующей ей моляльности раствора μ (моль/г) [83].

NaNO₃

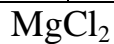
a_w	0,997	0,984	0,970	0,942	0,906	0,868	0,805
C	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$4,210^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$1,710^{-1}$	$2,510^{-1}$	$4,210^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-1}$
M	0,1	0,5	1	2	3	5	6

KNO₃

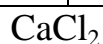
a_w	0,996	0,993	0,985	0,973	0,953	0,937
C	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	0,2	0,3
M	0,1	0,2	0,5	1	2	3



a_w	0,995	0,992	0,981	0,966
C	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	0,14
M	0,1	0,2	0,5	1



a_w	0,995	0,990	0,975	0,942	0,849	0,722
C	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	0,29
M	0,1	0,2	0,5	1	2	3



a_w	0,975	0,945	0,862	0,750
C	$5,55 \cdot 10^{-3}$	0,11	0,22	0,33
M	0,5	1	2	3



a_w	0,983	0,967	0,937	0,972	0,851	0,807	0,760
C	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	0,18	0,23	0,29	0,35
M	0,5	1	2	3	4	5	6



a_w	0,997	0,993	0,984	0,968	0,936	0,904
C	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	0,15	0,22
M	0,1	0,2	0,5	1	2	3

Таблица 3.4. Связь между активностью воды в растворе a_w , концентрацией раствора (в долях к насыщенному $\alpha = \frac{c}{c_{sat}}$) и отношением

радиусов капли r и начального сухого ядра r_n , $\sigma = \frac{r}{r_n}$ для хлористого магния и

хлористого кальция .

MgCl_2 , $\rho_s = 1,54 \text{ г/см}^3$

a_w	0,53	0,56	0,66	0,72	0,76	0,82	0,89	0,90	0,96	0,98
A	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Σ	1,53	1,58	1,65	1,72	1,81	1,93	2,07	2,28	2,16	3,29

NaCl, $\rho_s = 2,16 \text{ г/см}^3$

a_w	0,75	0,77	0,81	0,84	0,86	0,88	0,92	0,94	0,96	0,98
A	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Σ	1,82	1,88	1,95	2,05	2,15	2,29	2,46	2,71	3,11	3,91

Численное решение (3.4) было проведено следующей последовательностью операций. Начальный радиус капли соответствовал радиусу насыщенного раствора для взятого химического состава r_{sat} . Этот радиус рассчитывался из соотношения:

$$c_{sat} = \frac{r_s^3 \rho_s}{(r_{sat}^3 - r_s^3) \rho_w}, \quad r_{sat} = r_s \sqrt[3]{\frac{c_{sat} \rho_w + \rho_s}{c_{sat} \rho_w}}, \quad (3.5)$$

где ρ_s и ρ_w – соответственно плотности рассматриваемой соли и воды. На первом шаге по времени с t_1 для насыщенного раствора находится $r(t_1)$. По найденному $r(t_1)$ определяется отношение концентраций

$$\alpha(t_1) = \frac{c(r(t_1))}{c_{sat}} = \frac{r_{sat}^3 - r_s^3}{r^3(t_1) - r_s^3}. \quad (3.6)$$

Определив $\alpha(t_1)$ из таблицы 3.3, находится $a_w(t_1)$, с которым рассчитывается $r(t_2)$, и так далее.

Результаты расчета изменения во времени радиуса капли раствора *NaCl* с начальным радиусом 0,955 мкм насыщенного раствора *NaCl* при радиусе сухого ядра *NaCl* 0,5 мкм представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 Результаты расчета по формуле (3.4) изменения во времени радиуса капли раствора *NaCl* при начальном радиусе насыщенного раствора $r = 0,955$ мкм, радиус сухого ядра *NaCl* 0,5 мкм.

Время t в секундах, радиус капли r в мкм.

$t, \text{ с}$	$2,095 \times 10^{-3}$	$1,506 \times 10^{-3}$	$3,051 \times 10^{-2}$	$4,017 \times 10^{-2}$
$r, \text{ мкм}$	1,218	1,2960	1,3613	1,3953
$t, \text{ с}$	$1,033 \times 10^{-1}$	$5,072 \times 10^{-1}$	1,0	1,579
$r, \text{ мкм}$	1,5593	1,9715	2,306	2,4320

t, c	2,073	3,081	4,014	6,080 ²
$r, \text{мкм}$	2,5551	2,7516	2,8908	3,1132
t, c	8,897	10,002	14,97	17,75
$r, \text{мкм}$	3,3519	3,4363	3,746	3,8879
t, c	21,07	25,13	30,19	45,64
$r, \text{мкм}$	4,0346	4,1868	4,3448	4,679
t, c	58,52	74,04	91,50	125,8
$r, \text{мкм}$	4,855	5,0386	5,229	5,5617
t, c	178,1	210,2	307,2	
$r, \text{мкм}$	5,989	6,215	6,7763	

Определив $\alpha(t_1)$ из табл. 3.3, находится $a_w(t_1)$, с которым рассчитывается $r(t_2)$, и так далее. Величина $S-1$ в облаках приблизительно равна 0,005. Это значительно меньше a_w , кроме области очень малых концентраций солей. Поэтому считалось $S=1$, и рост капли был обусловлен только раствором соли.

Результаты расчетов изменения радиуса капли солевого раствора во времени даны в табл.3.5. Она включает расчеты для трех химических составов солей: $MgCl_2$, $NaCl$ и KCl . Расчеты изменения радиуса капли раствора начинались с момента образования капли насыщенного раствора. До этого должно пройти время поглощения гигроскопическим ядром влаги и растворения в ней солевого ядра. В течение процесса частичного растворения ядра конденсация происходит при фактически насыщенном растворе при очень малом радиусе капли, значит, полное растворение ядра продолжается очень короткое время, которым можно пренебречь. Для всех трех составов изменение во времени величины радиуса капли раствора имеет одинаковый характер и очень близко количественно. Интенсивность роста размера капли резко уменьшается во времени. Для радиуса солевого ядра до 1,5 мкм радиус капли даже за 30 мин не дорастает до 20 мкм. Ядру радиуса в 3 мкм требуется около 10 мин, чтобы капля на нем достигла радиуса в 20 мкм. Хотя

активность воды в растворе для $MgCl_2$ заметно больше, чем для $NaCl$ и KCl , скорость роста капли наибольшая для $NaCl$. Это объясняется наибольшим для $NaCl$ отношением радиусов насыщенного раствора и солевого ядра, а, следовательно, и большим радиусом капли насыщенного раствора.

Таблица 3.6. Изменение радиуса капли (мкм) во времени t (сек), растущей на сухом ядре с радиусом r_s (мкм) при температуре $5^\circ C$ для трех химических составов ядер. Верхняя строка – $MgCl_2$, средняя строка – $NaCl$, нижняя строка – KCl . Отношения радиусов насыщенного раствора r_{sat} к радиусу r_n :

$MgCl_2$ – 1,66; $NaCl$ – 1,91; KCl – 1,76[83]

t,сек	5	15	30	120	240	600	1200	1800
r_s ,МКМ								
1	4,40	5,60	6,26	8,11	9,52	11,6	13,1	14,3
1	4,78	5,95	6,88	8,75	10,1	12,4	14,0	15,2
	4,10	5,30	6,31	8,05	8,97	11,0	13,0	14,3
1,5	5,65	6,98	8,02	10,0	11,8	14,6	16,9	18,2
	6,17	7,55	8,70	11,4	12,8	15,6	18,1	19,5
	5,38	6,54	7,73	10,6	11,8	13,7	16,1	17,7
3	8,82	10,8	12,2	15,9	18,3	21,4	24,9	27,1
	9,52	11,6	13,3	17,4	20,1	23,5	26,8	29,3
	8,95	10,3	11,4	15,4	18,2	22,2	24,2	25,8
7	16,5	18,8	21,0	26,7	30,7	36,8	41,9	45,3
	17,3	20,0	22,5	29,2	33,2	39,8	46,2	50,1
	16,2	18,6	20,6	25,3	28,7	35,2	42,0	46,0

Теоретические расчеты и лабораторные эксперименты показывают, что при радиусе солевого ядра 1-2 мкм образующиеся капли не дорастают до радиуса 20 мкм, т.е. до начала гравитационной коагуляции капель.

В следующих подразделах последовательно рассматриваются факторы, характеризующие возможные результаты искусственного вызывания осадков: размеры частиц искусственных осадков; размеры зон

искусственных осадков; количество осадков, которое может быть получено в результате воздействия гигроскопической частицей, несущей электрический заряд.

3.3. Расчетная формула для числа столкновений электрически заряженных капель

Начальные концентрации положительно и отрицательно заряженных капель насыщенного раствора *NaCl* радиуса 0,5 мкм, попавшие в облачную среду, мгновенно превращаются в капли насыщенного раствора *NaCl* радиусом 0,955 мкм (табл.3.6). Для концентрации частиц $1,0465 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ потребуется следующее количество влаги:

$$1,0465 \cdot 10^6 \left\{ \frac{4}{3} \pi [0,955^3 - 0,5^3] \right\} \cdot 10^{-12} = 3,268 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3. \quad (3.7)$$

Чтобы обеспечить влагой все частицы, водность облака должна быть $3,268 \text{ г/м}^3$. Тогда будем иметь концентрацию капель $1,0465 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$.

Желательно рассмотреть реальное облако со значительно меньшей водностью, а концентрацию заряженных капель исчислять в концентрации на литр облачной среды, как это обычно считается для введенных частиц реагента.

Легко установить, что такое же количество облачной влаги потребуется для концентрации заряженных капель насыщенного раствора *NaCl*, если она будет $6,419 \times 10^8 \text{ литр}^{-1}$ при водности облака 2 г/м^3 . Таким образом, предположим, что в начальный момент времени имеется концентрация положительно заряженных капель радиуса 0,955 мкм с зарядом $1900e^+$, равная $0,03 \times 6,419 \times 10^8 \text{ литр}^{-1}$, и отрицательно заряженных капель с $63e^-$ с концентрацией $0,97 \times 6,419 \times 10^8 \text{ литр}^{-1}$.

Далее начнется турбулентная коагуляция заряженных капель раствора *NaCl*. Расчеты коагуляции потребуют знание механизмов коагуляции, а также конденсационного роста капель раствора *NaCl*. Кроме того,

потребуется учесть диффузионное рассеяние турбулентной среды. Рассмотрим все это в отдельности.

Выражение для коэффициента турбулентной коагуляции K_t приводится обычно без его вывода, например, [249,251]. Этот коэффициент имеет вид:

$$K_t = (r_1 - r_2)^2 \left[A_1 \left(\frac{\varepsilon^3}{\nu} \right)^{1/2} (\tau_1 - \tau_2)^2 + A_2^2 \left(\frac{\varepsilon^3}{\nu} \right) (r_1 - r_2)^2 \right]^{1/2}, \quad (3.8)$$

где r_1 и r_2 – радиусы сталкивающихся капель, ε – скорость диссипации турбулентной энергии в единицу времени на единицу массы облачной среды, ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, τ_i – время релаксации капель в стоксовом интервале скоростей их движения.

$$\tau_i = \frac{2r_i^2 \rho}{9\eta}, \quad \eta = \nu \rho_{\text{возд}} = 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ СГСЕ при } T = 0^\circ\text{C}, \quad (3.9)$$

где η – коэффициент динамической вязкости воздуха, ρ , $\rho_{\text{возд}}$ – соответственно плотности воды и воздуха. Постоянные коэффициенты примем по [212]: $A_1 = 5,4$; $A_2 = 1,7$.

Турбулентными параметрами в (3.8) являются ε и ν . Это означает, что K_t описывается микромасштабным интервалом турбулентных пульсаций. Размер минимальных турбулентных пульсаций Λ выражается как $\Lambda \sim (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$. Для $\nu = 0,135 \text{ см}^2/\text{с}$ и $\varepsilon = 500 \text{ см}^2/\text{с}$, которые соответствуют центральной области мощного конвективного облака [251], получается $\Lambda = 0,07 \text{ см}$. Турбулентное перемешивание в области с линейными размерами, меньшими Λ , обусловлено только хаотичным характером турбулентных пульсаций.

Члены в квадратной скобке (3.8) означают разные механизмы турбулентного перемешивания в указанном интервале турбулентных пульсаций. С учетом параметров, связанных с данным механизмом, каждый член конструируется из соображений размерности.

Для удобства расчетов преобразуем K_t , принимая опять-таки $\nu = 0,135$ см²/с и $\varepsilon = 500$ см²/с. Тогда с учетом (3.9) :

$$K_t = 103,46 \cdot 10^{-12} (r_1 + r_2)^3 \left[1 + 0,1830 (r_1 - r_2)^2 \right]^{1/2}, \quad (3.10)$$

- где радиусы капель должны быть взяты в мкм.

Чтобы получить расчетную формулу для числа столкновений капель с концентрациями $n_1(r_1, q_1)$ и $n_2(r_2, q_2)$, зависящими от радиусов капель и их зарядов, нужно в (3.10) добавить множители: $E(r_1, q_1; r_2, q_2)$ – коэффициент захвата для капель с соответствующими радиусами и электрическими зарядами; концентрации капель и время столкновений τ . Тогда формула для парного столкновения капель в литре облачной среды за время τ принимает вид:

$$N(r_1, q_1; r_2, q_2) = E(r_1, q_1; r_2, q_2) K_t n_1(r_1, q_1) n_2(r_2, q_2) \tau. \quad (3.11)$$

Имеющиеся сведения о величинах $E(r_1, q_1; r_2, q_2)$ изложены ниже.

3.4. Укрупнение заряженных капель в результате электрической коагуляции

Расчеты столкновений заряженных капель, а следовательно, и их рост, связанный с электрической коагуляцией, проведены по формуле (3.11).

Отметим некоторые особенности этих расчетов. Коэффициент захвата E был взят, исходя из изложенного в выше. Основными критериями выбора E как для разноименных, так и для одноименных заряженных капель были произведение зарядов сталкивающихся капель (эта зависимость указана и в параметре [157]) и соотношение радиусов капель. Если для произведения разноименных зарядов 40000 в указанном разделе 9 E считался равным 5,46, то для произведения таких зарядов 60000 E был взят равным 6 для капель близких радиусов. С уменьшением произведения зарядов и увеличения разницы между радиусами капель E существенно уменьшалось.

Формула (3.11) относится только к парным столкновениям капель. Нет каких-либо оснований для того, чтобы полностью исключить двойные и большие одновременные столкновения капель. Они исключены просто из общих соображений.

По мере столкновений капель, приводящих к их слиянию, число еще не столкнувшихся капель уменьшается. Однако уменьшение числа сталкивающихся капель за счет уже столкнувшихся не учитывалось. Это было компенсировано выбором очень малого шага по времени (не более 0,5 с).

Если капля даже за указанный малый временной шаг расчета испытывала несколько столкновений, то это приводило к занижению числа столкновений. Учитывался только начальный радиус капли, который возрастал в зависимости от числа столкновений. Возможное значительное число столкновений могло изменить взятый первоначальный коэффициент захвата.

В самом начале столкновений капель были приняты во внимание наиболее вероятные столкновения: положительно заряженных капель с отрицательно заряженными. Количество столкновений отрицательно заряженных капель с каждым сортом положительных капель зависит от концентрации последних. Чтобы это учесть при распределении отрицательных капель на положительно заряженные капли, находились весовые множители такого распределения. Сначала формально рассчитывались столкновения полной концентрации отрицательно заряженных капель с каждым сортом положительных капель, как будто бы только такой сорт положительно заряженных капель существует. Затем эти столкновения суммировались, а далее находились весовые множители как отношение числа столкновений с выделенным сортом положительных капель к полному числу столкновений со всеми сортами положительных капель.

Из рассчитанного с весовым множителем истинного значения числа столкновений N при известной концентрации данного сорта положительных

капель находилось отношение числа столкновений к концентрации положительных капель. Другими словами, количество отрицательных капель, попавших на одну положительную каплю. В случае, когда указанное отношение оказывается дробным, то концентрация положительно заряженных капель распределялась по целому числу столкновений. Так, например, для более двух, но менее трех столкновений: концентрация положительных капель с уменьшенным зарядом, равным двум отрицательным зарядам отрицательных капель, равнялась $3n(qe+) - N_{\text{столк}}$, а с тремя столкновениями равнялась: $N_{\text{столк}} - 2n(qe+)$, где $n(qe+)$ – первоначальная концентрация положительно заряженных капель, а $N_{\text{столк}}$ – их число столкновений с отрицательными каплями. Аналогичные соотношения легко получить и для любого дробного значения столкновений.

Процесс столкновения капель сопровождался их конденсационным ростом и уменьшением их концентрации за счет турбулентной диффузии. Принимая во внимание соотношение между интенсивностями этих процессов, как принято, по методу расщепления на физические процессы для каждого промежутка времени, будем, прежде всего, оценивать конденсационный рост капель, затем среднее уменьшение их концентрации в начале и в конце взятого временного интервала, наконец, электрическую коагуляцию.

В табл.3.9 приведены результаты расчета концентрации капель в зависимости от времени с указанием заряда капель и их радиуса. Как видно, со временем число градаций концентраций капель с различными зарядами возрастает. В интервале времени 1-1,5с электрическая коагуляция приводит к 14 градациям.

Таблица 3.9. Изменение в первые секунды τ концентрации (в литре облачной среды) образовавшихся заряженных капель на заряженных гигроскопических частицах $n(q)$ в зависимости от их заряда q (в абсолютных единицах заряда электрона e с указанием знака заряда), радиус капель r (мкм):

$\tau = 0 \text{ с}$		$r, \text{ мкм}$
1	$n(1900 e^+) = 1,926 \times 10^7$	0,955
2	$n(63 e^-) = 6,227 \times 10^8$	0,955
$\tau = 0,1033 - 0,5 \text{ с}$		
1	$n(1711 e^+) = 0,1498 \times 10^7$	2,804
2	$n(1648 e^+) = 0,2552 \times 10^7$	3,092
3	$n(1522 e^+) = 0,2147 \times 10^7$	3,70
4	$n(1459 e^+) = 1,306 \times 10^7$	3,88
5	$n(63 e^-) = 5,477 \times 10^8$	1,97
$\tau = 0,5 - 1 \text{ с}$		
1	$n(1711 e^+) = 0,690 \times 10^6$	2,90
2	$n(1648 e^+) = 0,808 \times 10^6$	3,55
3	$n(1585 e^+) = 0,187 \times 10^7$	3,55
4	$n(1522 e^+) = 0,687 \times 10^6$	3,85
5	$n(1459 e^+) = 8,44 \times 10^4$	4,06
6	$n(1396 e^+) = 0,206 \times 10^7$	4,30

7	$n(577 e^+) = 1,083 \times 10^7$	6,13
8	$n(514 e^+) = 0,223 \times 10^7$	6,22
9	$n(63 e^-) = 2,874 \times 10^8$	2,306
$\tau = 1 \text{ с} - 1,5 \text{ с}$		
1	$n = 0,853 \times 10^7$ $q = 955 - 1711 e^+$	4,50
2	$n = 0,2142 \times 10^7$ $q = 325 e^+$	6,52
3	$n(53 e^-) = 1,083 \times 10^7$	7,06
4	$n(63 e^-) = 1,021 \times 10^8$	2,432
$\tau = 1,5 - 2 \text{ с}$		
1	$n = 0,853 \times 10^7$ $q = 272 - 1028 e^+$	8,37
2	$n = 0,2142 \times 10^7$ $q = 332 e^-$	9,06
$\tau = 2,5 - 3 \text{ с}$		
1	$n = 2,53 \times 10^5$ $q = 856 - 3880 e^+$	14,7

В нашу задачу входит только показать, что сильно заряженные капли, образовавшиеся на заряженных гигроскопических частицах, приводят даже в отрыве от неминуемого их взаимодействия с каплями естественной облачной среды к размерам, которые приводят к гравитационной коагуляции и выпадению осадков. Поэтому исключим неоправданно трудоемкие расчеты следующим образом. Подразделим 14 упомянутых градаций во временном интервале 1-1,5 с, сохранив только 4. Для этого объединим все концентрации положительных капель с зарядами от $1711e^+$ до $955e^+$ со средним радиусом

4,5 мкм. Суммарная концентрация окажется равной $0,853 \times 10^7$. Кроме этой концентрации останутся концентрация с зарядом капель $325e^+$, равная $0,2142 \times 10^7$ с $r = 6,52$ мкм, а также концентрации с отрицательно заряженными каплями: $n(53e^-) = 1,083 \times 10^7$ с $r = 7,06$ мкм, $n(63e^-) = 1,021 \times 10^8$ с $r = 2,432$ мкм.

Необходимо разграничить физические процессы: сначала столкновения положительных капель с зарядом, большим $955e^+$, до $1711e^+$ и отдельно с зарядом $325e^+$ с отрицательными каплями с $53e^-$ на половине интервала 1,5-2с. На второй половине этого временного шага с указанным результатом столкновений столкнутся капли с зарядом $63e^-$ —Ввиду малой концентрации капель с зарядом $53e^-$ произойдет только одно столкновение с каплями всех положительных зарядов, что понизит заряд на $53e^-$.

Столкновение отрицательных капель с $63e^-$ на второй половине шага приводит к 10 столкновениям с положительными каплями с большим зарядом и 8 столкновений с зарядом $272e^+$.

В течение интервала 2,5-3с произойдет столкновение капель с зарядом, большим $272e^+$ и отрицательных капель с зарядом $232e^-$. С учетом диффузии в литре облачной среды сформируются положительные капли с концентрацией $2,528 \times 10^5$ литр⁻¹ и радиусом 14,6 мкм. Все это иллюстрируется табл.3.9.

Таким образом, после введения в облако гигроскопического заряженного реагента в облачной среде формируется система: искусственно созданные положительно заряженные капли с зарядом $856 \div 3880e^+$, концентрацией $2,53 \times 10^5$ /литр, радиусом капель 14,7 мкм, с одной стороны, - система облачных капель естественного происхождения с радиусами, большими по крайней мере 10 мкм, их концентрацией в несколько тысяч в литре облачной среды (по измерениям в мощном кучевом облаке Н.К.Weickmann и воспроизведенном в [173,168]), с другой стороны.

Кроме того, считается, что облачные капли заряжены со средней величиной заряда, например [159], $|q| = 10-4R$, где R – радиус капли в см, а заряд q в системе СГСЕ. Следовательно, капля в 10 мкм несет заряд без указания его знака в 200 зарядов электрона. А по [248] $q = (10...20)R$, где R в мкм, т.е. приблизительно такая же величина заряда, но он отрицательный.

Такая система капель в облаке не может не привести к гравитационной коагуляции и выпадению осадков. Однако для их интенсивности, количества, продолжительности потребуются специальные теоретические и экспериментальные исследования. Следовательно, применение гигроскопических веществ может быть эффективным при воздействии на теплые облака.

Применение растворов гигроскопических веществ (в частности морской воды) для АВ на облака может быть более эффективно, чем обыкновенной воды при диспергировании мелкими каплями. Растворы солей в морской воде в качестве гигроскопического реагента приведены на рис.3.1.

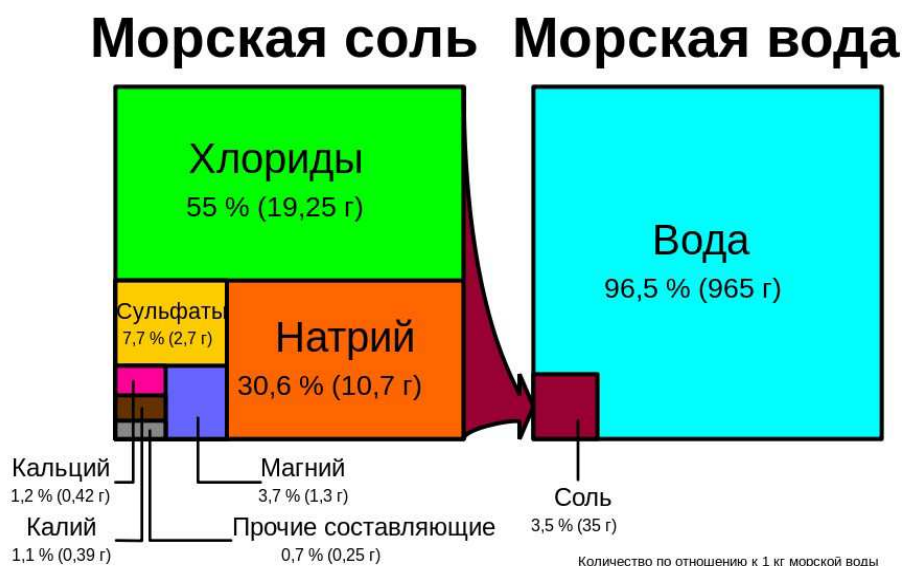


Рисунок 3.1. Морская вода (www.wikipedia.org).

Основным компонентом солей морской воды являются хлориды(55%), в целом соль составляет 3,5% на 1л морской воды.

3.5. Искусственное вызывание осадков растворами гигроскопических веществ

Самолеты Ан-2п, Ан-32п, Бе-200п, оснащенные системой подачи водных растворов в имеющиеся емкости, могут проводить ИВО растворами гигроскопических веществ различной концентрации. Из теоретических расчетов, приведенных в пункте 3.6 следует, что скорость роста капли наибольшая для NaCl. Она больше, чем у солей магния и калия. Поэтому в дальнейшем рассмотрим ИВО каплями насыщенного раствора NaCl, однако соли магния и калия могут быть весьма перспективными в континентальных районах, где отсутствуют ядра конденсации морского происхождения, содержащие эти металлы.

Моделирование воздействия гигроскопическими реагентами приводится в ряде работ [23,33,55,211,218,285]. Исследовались время засева, высота, размеры частиц реагента и другие параметры. Радиус частиц осадков во многом зависит от высоты, на которой капля начинает свой рост в облаке, т.е. уровня (Н) введения реагента в облако. Наряду с мощностью и водностью облака важным фактором, влияющим на рост частиц реагента, является скорость восходящих потоков. В облаках со скоростью развития 0,5-1м/с мелкие капли ($R \sim 5 \mu\text{м}$) поднимаются до больших высот, и, опускаясь, проделывают более длинный путь. Поэтому они достигают большого размера при своем выпадении из облака, чем частицы с первоначально большим радиусом [221].

При больших скоростях восходящего потока (8м/с и более) уровень введения реагента теряет значение как фактор, определяющий конечный размер осадков, так как введенные на различные уровни, частицы вырастают до одинаковых размеров. Имеет значение и уровень расположения максимальной скорости, чем он выше, тем дольше введенные частицы находятся в верхней части облака и вырастают до больших размеров. Более крупные осадки получаются при воздействии гигроскопическими частицами

с $R_0=5\text{мкм}$ Особенно эта разница велика, когда реагент вводится под нижней границей облака или на низкие уровни мощных облаков [54].

В маломощных облаках уровень введения реагента может быть любым, так как конечный размер осадков от него не зависит. В более мощные облака ($H\sim 4\text{км}$) реагент целесообразнее вводить в верхние слои, в этом случае конечный размер осадков может быть увеличен почти на 30%. Теоретические расчеты показывают, что для облака мощностью 2км оптимальный расход реагента, диспергированного радиусом 5мкм, для ввода с нижней границы составляет 1кг, конечный размер капли ,выпадающей из облака при этом, составляет 0,85мм. При увеличении расхода реагента величина конечного радиуса выпадающей из облака капли значительно уменьшается [33,54,55]. Основной вывод, который может быть сделан в результате проведенных расчетов, состоит в том, что искусственные осадки появляются под облаком через 13-17 мин после засева облака.

Полевые эксперименты по ИВО из теплых конвективных облаков распылением растворов хлористого натрия в США, Англии, СССР, в Восточной Африке и др. странах[168]. В Восточной Африке использовался способ диспергирования реагента, состоящего из смеси морской соли(90%) и хлористого кальция(10%), взрыванием зарядов пороха, поднимаемых к облаку на шарах-пилотах. В дни с воздействиями солью сумма осадков превышала сумму осадков в дни без воздействия до 15мм. Во всех опытах, проводимых сотрудниками ГГО, искусственные осадки отмечались через 12-18 мин после воздействия [221]. Автор [168] делает вывод, что для установления возможностей данного способа, который обещает быть эффективным методом ИВО из теплых конвективных облаков, необходима дальнейшая работа.

Существуют два способа введения реагента в облако: мгновенный точечный источник или мгновенный линейный источник при использовании форсунок. Анализ распределения частиц реагента в зоне воздействия

показал, что их концентрация быстро убывает с удалением от точки или линии воздействия. Экспериментальные данные показывают, что ширина зоны осадков в значительной степени связана с мощностью облака и с расходом реагента. В среднем ширина зоны в полевых экспериментах составила 2-4км при мощности облака до 3км [221].

Количество осадков Q можно оценить, зная распределение частиц реагента внутри облака к моменту достижения облачными частицами размера приводящего к коагуляции и имея данные о росте частиц, падающих с различных высот [14]. На рис.3.2 приведены результаты расчета возможного количества осадков при воздействии разным количеством NaCl на облака различной мощности. Из рис.3.2 следует, что при рассмотренных трех мощностях облачности значение Q стремится к $Q_{\text{макс}}$. Это свидетельствует о том, что, начиная с некоторого значения расхода реагента, дальнейшее его увеличение не приводит к изменению количества осадков. Объясняется это тем, что частицы реагента при превышении определенной концентрации начинают конкурировать друг с другом за влагосодержание облака и в конечном итоге их рост прекращается.

При установлении оптимальных расходов реагента (NaCl) существенное значение имеет начальный размер частиц. На рост мелких частиц требуется много времени, поэтому их использовать при воздействии нецелесообразно.

Расчет норм расходов с более крупными частицами ($R_0=5\sim 10\text{мкм}$) показывает, что использование частиц с $R_0=10\text{мкм}$ не приводит к увеличению количества осадков по сравнению с частицами с $R_0=5\text{мкм}$, но для достижения одного и того же количества осадков расход реагента при $R_0=10\text{мкм}$ должен быть существенно большим.

Для искусственного вызывания цепной реакции образования облачных капель целесообразно проводить засев конвективного облака более крупными каплями порядка 3мм.

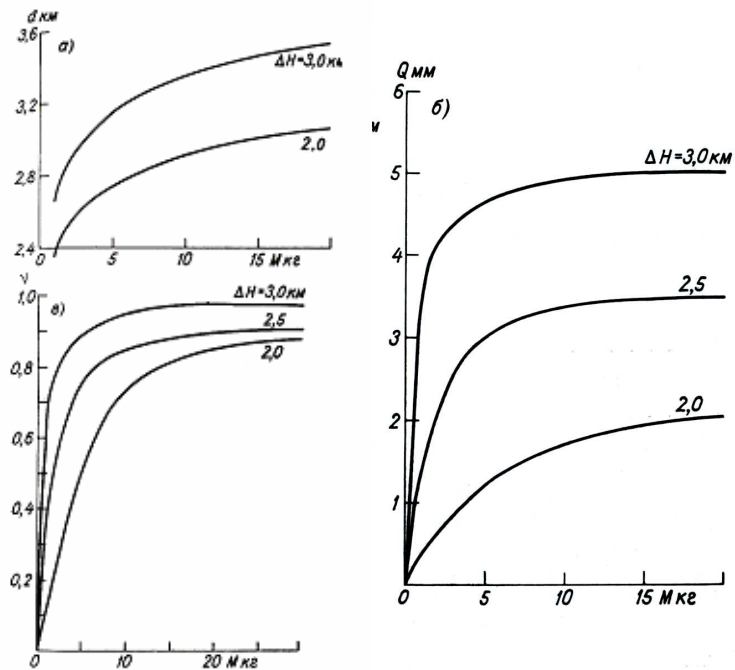


Рисунок 3.2. Результат воздействия в зависимости от мощности облака и расхода NaCl: а-ширина зоны осадков d , б- количество осадков Q , в- коэффициент использования облачной влаги v [221].

Например, при воздействии на облако с мощностью 3 км частицами NaCl с $R_0=10$ мкм для получения $Q=5.5$ мм требуется $M_{opt} = 0,92$ кг, а при использовании частиц с $R_0=5$ мкм NaCl требуется $M_{opt} = 0,47$ кг. Таким образом, расчеты позволяют установить оптимальное значение начальных размеров частиц реагента для NaCl $R_{opt}=5$ мкм.

Применение гигроскопических веществ для АВ на облака более эффективно при отрицательной температуре облачной среды, чем обыкновенной воды, так как температура замерзания растворов ниже нуля градусов по Цельсию. Это очевидное преимущество гигроскопических веществ по сравнению с льдообразующими реагентами с пороговой температурой льдообразования ниже -4°C , позволяющее проводить засев облаков в диапазоне температур $0- -4^{\circ}\text{C}$. Поэтому исследования возможности применения растворов гигроскопических веществ для вызывания осадков из облаков, основанные на интенсификации конденсационного роста капель раствора, продолжают уже многие годы[33, 54, 55, 221, 279, 285].

Выводы к Главе 3

В Главе 3 приводится обоснование применения растворов гигроскопических реагентов, в том числе в составе морской воды, для ИВО на лесные территории. Преимуществом гигроскопических реагентов является отсутствие пороговой температуры применения реагента. Основными факторами, от которых зависит эффективность АВ гигроскопическими веществами, являются: мощность облака, влагосодержание, микрофизические параметры; химический состав, степень дисперсности и концентрация используемого реагента; технология применения реагента (способ диспергирования, уровень засева относительно нижней границы, использование вертикальных токов воздуха и т.д.).

Засев гигроскопическими частицами континентальных облаков оказывает более сильное влияние на осадки. Для умеренно континентальных облаков получено увеличение количества осадков на 65% и на 109% для резко континентальных, т.е. в районах, где вероятность лесных пожаров наиболее высока. Морские ядра конденсации, полученные непосредственно из морской воды, наиболее эффективны в континентальных районах.

Нормы воздействия и способы введения гигроскопического реагента (количество вещества, количество осадков, размер его частиц и др. параметры) установлены для конвективной облачности расчетным методом и экспериментально в полевых опытах при применении поваренной соли (NaCl). Теоретические расчеты и лабораторные эксперименты показывают, что при радиусе солевого ядра 1-2 мкм образующиеся капли не достигают до радиуса 20 мкм, т.е. до начала гравитационной коагуляции капель.

Радиус частиц осадков во многом зависит от высоты, на которой капля начинает свой рост в облаке, т.е. уровня (H) введения реагента в облако. Наряду с мощностью и водностью облака важным фактором, влияющим на рост частиц реагента, является скорость восходящих потоков. В облаках со скоростью восходящих потоков 0,5-1 м/с мелкие капли ($R \sim 5 \mu\text{м}$)

поднимаются до больших высот и, опускаясь, проделывают более длинный путь. Поэтому они достигают большего размера при своем выпадении из облака, чем частицы с первоначально большим радиусом.

При больших скоростях восходящего потока (8м/с и более) уровень введения реагента теряет значение как фактор, определяющий конечный размер осадков, так как введенные на различные уровни, частицы вырастают до одинаковых размеров. Имеет значение и уровень расположения максимальной скорости, чем он выше, тем дольше введенные частицы находятся в верхней части облака и вырастают до больших размеров.

Более крупные осадки получаются при воздействии гигроскопическими частицами с $R_0=5\text{мкм}$. Особенно эта разница велика, когда реагент вводится под нижней границей облака или на низкие уровни мощных облаков.

В маломощных облаках уровень введения реагента может быть любым, так как конечный размер осадков от него не зависит. В более мощные облака ($\Delta H \sim 4\text{км}$) реагент целесообразнее вводить в верхние слои, в этом случае конечный размер осадков может быть увеличен почти на 30%.

Теоретические расчеты показывают, что для облака мощностью 2 км оптимальный расход реагента, диспергированного радиусом 5 мкм, для ввода с нижней границы составляет 1кг, конечный размер капли, выпадающей из облака при этом, составляет 0,85мм. При увеличении расхода реагента величина конечного радиуса, выпадающей из облака капли значительно уменьшается. Искусственные осадки появляются под облаком через 13-17 мин после засева. Полевые эксперименты показали, что во всех опытах искусственные осадки отмечались под облаком через 12-18мин после воздействия, что говорит о высокой эффективности данного способа.

Степень точности расчета электрической коагуляции по известным формулам определяется, прежде всего, взятым значением коэффициента захвата E при столкновении капель. К сожалению, в настоящее время о

значениях E в зависимости от произведения зарядов сталкивающихся капель, а также соотношениях между их радиусами имеется очень мало сведений.

Следует подчеркнуть, что строгий расчет процесса электрической коагуляции между каплями с целым спектром различных электрических зарядов представляет сам по себе очень сложную задачу. Он связан с объемными выкладками и может быть выполнен только численными методами.

Выполненный на первых двух временных шагах строгий расчет электрической коагуляции первоначально заряженных капель показывает, что уже через $3c$ после образования заряженных капель формируется концентрация положительно заряженных капель с зарядом $\sim 4000e+$ и радиусом $14,7$ мкм, которая равна $2,53 \times 10^5$ капель на литр облачной среды.

Взаимодействия этой концентрации с естественной системой облачных капель с радиусами до 10 мкм и их концентрацией в несколько тысяч в литре среды электрически заряженных отрицательно до $200e$, должно привести к гравитационной коагуляции капель до размера осадков. Для определения интенсивности осадков, их продолжительности и общего количества требуются отдельные исследования.

Глава 4. Обоснование электрических методов искусственного регулирования осадков

4.1. Физические основы электрических методов

Электричество облаков может быть и следствием и причиной фазовых и структурных преобразований воды в атмосфере. Впервые рассматривать энергию неустойчивости электрического происхождения предложил И.М. Имянитов [75], который считал, что наряду с энергией термодинамической и коллоидной неустойчивости в облаках может при известных обстоятельствах активно проявлять себя и энергия неустойчивости электрического происхождения. В каких именно процессах может проявляться эта энергия уточнений не было сделано, тем не менее, Илья Моисеевич усматривал

возможности эффективного вмешательства в атмосферно-электрические процессы с доступной людям относительно малой энергией.

С нашей точки зрения, проявление энергии неустойчивости электрического происхождения целесообразно представлять в виде энергии неустойчивости первого вида, которая проявляется при достижении предела Релея и второго вида, которая проявляется в молниевых разрядах при накоплении электричества в отдельных объемах кучево-дождевого облака. Процесс накопления и разделения зарядов наблюдается в кучево-дождевых облаках в восходящих и нисходящих струях и термиках в результате укрупнения, дробления и испарения облачных капель и кристаллов. Средняя концентрация струй составляет 40 на 1 км^2 или 750 термиков в 1 км^3 по данным исследований, проведенных в США [166]. Соответственно, могут быть установлены критерии для выражения энергии неустойчивости электрического происхождения как предел Релея для капель и предельное количество электричества при грозовых разрядах.

И. М. Имянитов считал, что укрупнение частиц в конвективном облаке может быть достигнуто стимулированием процесса гравитационной коагуляции при распылении капель воды в верхней части облака. Начальный радиус частиц реагента (R_0) незаряженных капель воды при этом, чтобы вызвать процесс гравитационной коагуляции с облачными каплями, должен быть не менее 30 мкм [76]. В главе 2 было показано, что для того чтобы вызвать баллоэлектрический эффект размер капель должен быть 2,5мм и выше.

Целью применения электрических сил в активных воздействиях может быть снижение начального радиуса искусственной частицы для генерации цепного процесса образования крупных капель в растущем облаке за счет использования электрических сил во взаимодействиях укрупнения облачных капель. Последнее возможно при засеве облака искусственно заряженными каплями воды, резко увеличивающими

коэффициент захвата E облачных частиц или введением иного реагента с достаточно большим электрическим зарядом.

Оценка количества реагента (воды), составит 4 кг на 1 км диспергированного до капель радиусом 10 мкм [73]. Предельный заряд для капель 10 мкм равен порядка $3 \cdot 10^{-14} \text{К}$. Частица реагента, несущая электрический заряд, будет постепенно терять его вследствие электропроводности воздуха. Время потери значительной доли заряда должно быть значительно больше времени достижения частицей реагента радиуса R_0 , для гравитационной коагуляции. В табл. 4.1 приведено значение времени, за которое заряд на частице реагента уменьшится в e (2,7) раз в безоблачной атмосфере.

Таблица 4.1. Время уменьшения заряда в три раза [73]

Н,км	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Т,с	800	500	300	200	150	100	90	70	60

В облаках электропроводность воздуха значительно меньше, чем в безоблачной атмосфере, поэтому соответственно и больше время потери заряда частицей реагента. Например, на высоте 3-5 км в облаке время T может быть около 1000с. За это время введенная в облако частица реагента должна вырасти по крайней мере до размера радиусом 18-20 мкм, когда начнет действовать механизм гравитационной коагуляции. С этой целью в работе [73] были выполнены расчеты времени роста частицы реагента в монодисперсном облаке, заряженной до величины q , близкой к предельной (табл.4.2). Коэффициент захвата E зависит от величины заряда частицы реагента и от соотношения размеров облачных капель и частиц реагента. Как видно из таблицы 4.2, относительно малые изменения параметров частиц и параметра E могут повлечь резкое увеличение Δt , что может привести к отсутствию эффекта воздействия. В результате этого внедрение электрических сил для воздействия на капельные облака встречается с

большими техническими трудностями, однако поиск таких решений весьма целесообразен.

Таблица 4.2. Время роста свободно падающей заряженной капли [73]

r, мкм	W, г/м ³	R ₁ =10→		R ₂ =20→		Δt ₁ + Δt ₂ сек
		R ₀ =20мкм		R ₀ =30мкм		
		E ₁	Δt ₁ ,с	E ₂	Δt ₂ ,с	
5	1,0	5	400	1,0	1100	1500
5	1,0	50	40	1,0	100	140
7	1,0	5	500	1,0	1200	1700
7	1,0	50	50	1,0	100	150

Мощные конвективные облака представляют собой неустойчивую коллоидную систему, находящуюся в метастабильном состоянии, чтобы вызвать осадки достаточно лишь небольшого внешнего воздействия. Применение электрически заряженной воды или электрически заряженных аэрозолей (гигроскопических ядер) окажется более эффективным, чем применение незаряженных реагентов.

Возможны два пути такого вмешательства. Процессы конденсации и гравитационной коагуляции происходят на фоне электрических полей в атмосфере и образования электрических зарядов капель и кристаллов. Первый путь - это воздействие на сами электрические процессы в облаках, влияющие на фазовые и микроструктурные преобразования атмосферной влаги, с целью регулирования развития облаков. Электрические поля напряженностью более $3 \cdot 10^4$ В/м могут положить начало коагуляционного процесса в области прекращения конденсационного роста и при отсутствии гравитационной коагуляции. Однако, для реализации этого метода необходимы значительные водности (1г/м³ и более) и значительные поля напряженностью 10^5 В/м. Искусственная генерация таких полей в больших объемах воздуха довольно сложна. Второй путь – это воздействие на

микрофизические процессы в облаках различными реагентами, существенным образом изменяющие их электрическое состояние.

На основе этих положений Имянитов И.М. [73] рассматривает несколько методов воздействия электрическими методами: - воздействие электрическими методами на конденсационные процессы; - воздействие электрическими методами на процессы кристаллизации в облаках; - воздействие электрическими методами на процессы коагуляции частиц в облаках.

Первый способ имеет ограниченное применение, так как основное его преимущество в активизации ядер конденсации, которых в атмосфере существует достаточное количество для образования облаков. У второго метода имеются мощные конкуренты в виде твердой углекислоты и других хладореагентов.

Работы, связанные с активными воздействиями на электрическое состояние облаков йодистым серебром проводились в ГГО во второй половине прошлого века. Самолетные воздействия на стадии развития облака были более успешными в определении эффекта воздействия. Как показали эксперименты, переключить знак заряжения на противоположный возможно путем изменения концентрации жидкой воды в облаке. Однако для разработки практического способа воздействий проведенных исследований оказалось недостаточно в связи с отсутствием адекватной теории электризации облака и технических средств для восстановления электрической структуры облаков [38,79].

Третий способ позволяет видоизменить структуру теплого облака. Стимулирование осадков может быть достигнуто интенсификацией коагуляции при введении диспергированных капель воды или заряженного реагента в виде капель воды или заряженного аэрозоля, или использовать баллоэлектрический эффект.

4.2. Взаимодействие легких ионов с облачными частицами

Обратимся к адсорбции ионов на поверхности водяных капель. Речь идет о физической адсорбции, когда нет сильного перекрытия электронных оболочек (обобществления электронов) иона различных химических элементов с поверхностными молекулами воды. Ионы и молекулы воды при их межмолекулярном взаимодействии сохраняют свою химическую индивидуальность.

Следует подчеркнуть, что существующие теории межмолекулярных взаимодействий предполагают малость размеров взаимодействующих молекул по сравнению с расстоянием между ними (между их "центрами"). Потенциал взаимодействия между соприкасающимися молекулами может быть найден только с помощью экспериментальных методов [45]. Следовательно, они не могут быть использованы для ответа на вопрос о судьбе иона, столкнувшегося с водной поверхностью капли. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо рассмотреть некоторые исследования по физической адсорбции.

При попадании газовой молекулы на поверхность она какое-то время остается на ней. Основными факторами, определяющими продолжительность пребывания молекулы на поверхности, являются: природа поверхности и самой молекулы, температура поверхности и кинетическая энергия молекулы [45]. Принимая во внимание широкий диапазон тепловых скоростей ионов, а также их взаимодействий с молекулами воды, есть основания считать, что часть ионов по химическому составу и скоростям будет находиться на поверхности капли достаточно время, чтобы интенсифицировать образование ледяного зародыша.

С энергетической точки зрения, на погружение иона вглубь капли воды должна быть затрачена энергия на разрыв водородных связей между молекулами воды. Энергия водородной связи оценивается в 1 эВ. Средняя тепловая энергия иона при $T=300$ К составляет около 0,4 эВ. Кроме того, электрические силы взаимодействия между ионом и молекулами-диполями

воды окажут дополнительное сопротивление для преодоления ионом водной поверхности при адсорбции иона на заряженных центрах с противоположным иону знаком. Система: «свободный ион - поверхность воды» переходит на более низкий энергетический уровень.

Сущность физической адсорбции сводится к насыщению неуравновешенных сил на поверхности адсорбента, что должно приводить к уменьшению поверхностного натяжения [237]. Другими словами, ион остается на поверхности, если его взаимодействие слабее, чем взаимодействие между самими молекулами воды.

На современном уровне теоретическое доказательство указанных взаимодействий должно быть проведено в рамках квантовохимического подхода. Пример расчета, приводимого в [259], показывает чрезвычайную сложность таких расчетов даже с многочисленными упрощениями, которые очень трудно (если вообще возможно) обосновать.

Остается воспользоваться экспериментальными фактами, изложенными в [205]. Кратко эти факты сводятся к следующему. Некоторые ионы взаимодействуют с молекулами воды сильнее этих молекул между собой (положительная гидратация); для других ионов имеет место противоположная ситуация (отрицательная гидратация). При этом положительная гидратация с понижением температуры может переходить в отрицательную. Положительным ионам натрия, калия, рубидия, цезия свойственна отрицательная гидратация.

В пользу именно поверхностного заряжения водяных капель свидетельствуют и косвенные факторы. Например, установление предельного поверхностного заряда капли из соображения разрыва поверхности капли электростатическими силами отталкивания. По Рэлею, величина заряда определяется приравниванием электростатической энергии поля удвоенному значению энергии поверхностного натяжения [156].

Расчеты взаимодействия электрического заряда капли с внешними заряженными частицами обычно предполагают либо сферическую симметрию заряда капли, либо значительное превышение расстояния взаимодействия над линейным размером взаимодействующих частиц, например, [162]. Таким образом, отсутствует конкретизация вида зарядов (диссоциированные ионы внутри капли или в какой-то степени гидратированные ионы на её поверхности). Ионы в воде как диэлектрической среде с жесткими полярными молекулами - диполями должны порождать связанный заряд на поверхности капли.

Гидратированные ионы, оставшиеся на поверхности капли, будут представлять электрическую систему: заряд самого "чистого" иона или электрона и совокупность диполей его окружающих, если гидратированная оболочка иона (лёгкий ион) состоит из одного слоя молекул; и опять-таки связанного заряда на поверхности гидратной оболочки, если эта оболочка состоит из нескольких слоев молекул (тяжелый ион).

Заметим, что в [88] под адсорбцией ионов водяными каплями понимается преодоление ими потенциального барьера на поверхности капли, величина которого 0,25 В. Считается, что только положительные ионы должны обладать соответствующей энергией для преодоления такого барьера; отрицательные ионы свободно проникают вглубь капли. По натурным измерениям образующееся конвективное облако заряжено положительно, так как отрицательные ионы ушли на образование капель. Принимая во внимание сказанное выше, такая стилизация взаимодействия иона с поверхностными молекулами воды представляется крайне упрощенной. Зарядение капель рассматривается как их коагуляция с ионами. При этом сделаны предположения: электрические поля капель не перекрываются ввиду достаточно малой их концентрации; время установления диффузионных потоков значительно меньше времени накопления зарядов для потока ионов на капли; на расстояниях, больших

длины свободного пробега ионов наблюдается максвелловское распределение по скоростям.

4.3. Влияние заряженного аэрозоля на укрупнение капель

Для теплых конвективных облаков нет общепринятого объяснения процесса образования осадков за короткий промежуток времени существования облака. На процессы конденсации и гравитационной коагуляции для укрупнения облачных капель требуется гораздо больше времени, нежели время существования конвективной ячейки.

Вопрос о росте облачных капель радиусом от 5 до 20 мкм остается нерешенным и в классической теории образования осадков. В связи с этим представляется важным рассмотреть влияние электрических сил на процесс укрупнения облачных капель в указанном диапазоне для объяснения укрупнения облачных элементов от замедления конденсационного роста капель радиусом 2-5 мкм до начала гравитационной коагуляции капель радиусом 18-20 мкм.

В атмосфере всегда существуют ионы, образующиеся под действием космических лучей, испарения воды с растительного покрова, радиоактивного излучения земной поверхности и других факторов. Впервые С.Вильсон обратил внимание на то, что в камере с пересыщением до 400% водяной пар конденсируется при введении ионов. Вопросы влияния электрических сил на конденсационно-коагуляционные процессы в разные годы рассматривались Б. Дж. Мейсоном [168], В.М. Мучником [173], Л.М. Левиным [159], Н.С. Шишкиным [248], Н.В. Красногорской [148], И.М. Имянитовым [72] и другими исследователями. Заряженные частицы в атмосфере играют существенную роль в процессе осадкообразования в естественных условиях Стожков и др. [230]. Влияние заряженных частиц на интенсивность осадков в атмосфере рассматривалось в ряде работ [157,174].

Расчеты роста капель на атмосферных ядрах конденсации, выполненные в середине прошлого века [168] показали, что капли до 1-2 мкм

растут за доли секунды. Практически капля к этому времени становится каплей чистой воды [166]. Дальнейший рост капли возможен за счет пересыщения водяного пара в облаке, присоединения новых гигроскопических ядер конденсации и др. факторов, но это очень медленный процесс. Время роста капель до радиуса 15 мкм составляет 50 мин [168]. Расчеты выполненные в [95] составляют 7,5 ч. Следовательно, в конвективных облачных ячейках, время жизни которых составляет в среднем 30-40 мин, образование облачных капель радиусом более 18 мкм, т.е. нижней границы радиусов капель, для которых возможна гравитационная коагуляция, нельзя объяснить только конденсацией водяного пара [173].

Так как устойчивость коллоидной системы в жидкостях определяется ее электрическими свойствами, то возникло предположение, что капли коллоидно-устойчивых облаков заряжены одноименными зарядами, вследствие чего они отталкиваются друг от друга и не сливаются. Когда капли нейтральные или их заряды становятся малыми, начинается коагуляция.

В классической работе Bergeron (1935) рассматривал следующие факторы осадкообразования: 1) электрические силы притяжения разноименно заряженных облачных капель или капель с индуцированными зарядами в электрическом поле земли; 2) гидродинамические силы; 3) различие капиллярных и гигроскопических сил на поверхности капель; 4) разность температур между теплыми и холодными каплями; 5) действие турбулентности. Однако Бергерон пришел к выводу, что перечисленные механизмы не являются эффективными в осадкообразовании.

Экспериментальные исследования, проведенные разными авторами [173], показали, что влияние электрических сил на коагуляцию капель является существенным. Опыты Н.А. Вагера [28] по осаждению искусственного тумана заряженными каплями воды выявили существование положительного эффекта. Искусственный туман в камере мог сохраняться

более 2ч, при воздействии наэлектризованными мелкими каплями воды происходило быстрое изменение его прозрачности. Плотность отрицательных зарядов капель воды была $\sim 2,5 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг, положительных $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг. При рассмотрении роста облачных капель в указанном диапазоне размеров В.М.Мучник[173] сделал вывод, что следует учитывать заряды капель. Движение частиц в облаке происходит под действием силы тяжести, силы трения, кулоновской силы электростатического взаимодействия, силы электрического поля поляризации капли под действием электрического поля земли, силы притяжения в результате индукции разноименных зарядов.

Измерения зарядов облачных частиц непосредственно в облаках показали, что 90% всех капель являются заряженными [73]. К образованию электрических зарядов на облачных частицах приводят процессы адсорбции ионов, фазовые переходы воды, разрушение частиц и др. факторы. В атмосфере всегда присутствуют ионы обоих знаков, так как ионообразование происходит непрерывно[230]. На основании экспериментального изучения эффективности соударения незаряженных близких по размерам капель можно считать, что столкновения чаще являются упругими и не приводят к слиянию [173]. Наличие электрического заряда, уменьшая поверхностное натяжение, способствует образованию соединительного канала между каплями. Образование соединительного канала происходит при потенциале, подаваемом на каплю меньше 10 В. Подобные потенциалы соответствуют зарядам облачных и дождевых капель.

Заряд мелких облачных капель меньше 10^{-5} эл. ст. ед.; заряды крупных капель в среднем $10^{-3} - 10^{-2}$ эл. ст. ед. [40]. Для капель радиусом 10мкм предельный заряд равен $\sim 3 \cdot 10^{-14}$ К. По заключению И.М. Имяникова [75], эффективность слияния столкнувшихся капель во многом зависит от напряженности электрического поля и от величины зарядов на каплях. Лабораторные измерения показывают, что изменение напряженности поля от

0 до 15 В/см увеличивает эффективность слияния крупных капель более, чем в три раза. Напряженность поля в кучевых облаках чаще всего 1-5 В/см [146 и др.].

Теоретическим путем в работе [158] показано, что заряды капель оказывают влияние на их коагуляцию в интервале размеров менее 30 мкм. Из расчетов следует, что в случае разноименных зарядов капель коагуляция усиливается за счет сил электрического взаимодействия. При наличии заряда на большой капле и отсутствии его на меньшей коагуляции способствует образование на меньшей капле индуцированного заряда. При столкновении капель достаточно больших размеров роль электрических сил значительно возрастает, в результате слияние капель становится более эффективным.

Многообразие механизмов электризации имеет различную значимость в разные периоды роста облака и при разных условиях. В растущем облаке под влиянием внешнего электрического поля атмосферы происходит поляризация зарядов. Конвективное облако на стадии *Cu hum* – *Cu med* целиком заряжено положительно [32], так как отрицательные ионы задействованы в процесс образования облачных капель, а положительные ионы поднимаются в восходящем потоке к вершине облака. В стадии *Cu cong* в облаке наблюдается вверху положительный заряд, а внизу отрицательный [73].

4.4. Коэффициент захвата капель заряженным аэрозолем в зависимости от их радиусов и зарядов

Исследования коагуляции заряженных облачных капель были проведены более 50 лет тому назад [159]. Наиболее достоверные величины E были получены экспериментально [148]. Величины E в зависимости от радиусов капель и их зарядов, установленные указанными выше авторами представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Значение коэффициента захвата E заряженных капель в зависимости от их зарядов и радиусов по [277].

Радиусы капель, мкм		Заряд капель, в $ e $		E
r_1	r_2	q_1	q_2	
5	2,5	-100	50	0,20
5	2,5	2000	-20	2,89
5	4	-2000	-20	4,43
5	4	2000	-20	5,46
5	4	2000	20	3,60

Помимо табл.4.3, установлено:

1) Капли одинакового радиуса в 5 мкм с разноименными зарядами $144e$ всегда сливаются, т.е. $E \geq 1$. Величина E не зависит от знака заряда при взаимодействии заряженной капли с зарядом $\sim 3 \times 10^4 e$ с нейтральной каплей радиуса 6,5 мкм [277].

2) При одинаковых зарядах капель эффективность их столкновения увеличивается с увеличением относительной влажности воздуха и уменьшением скорости их соударения. Автор [277] указала на влияние электрических сил на поверхностное натяжение жидкости как на одну из причин, способствующих слиянию капель. Существует некоторая критическая разность потенциалов, при которой вероятность слияния становится равной 100%. Эта разность для вероятности слияния капель 100% и 0% составляет около $2V$ [173].

Коэффициент захвата одноименно заряженных капель больше коэффициента захвата системы: заряженная капля - нейтральная капля. Это свидетельствует о том, что индукционные силы притяжения в случае одноименно заряженных капель больше их кулоновских сил отталкивания. Но при сравнительно больших значениях одноименно заряженных капель $q \cong -2 \times 10^3 e$ $E = 10^{-3}$; с уменьшением заряда в 10 раз E быстро растет.

Большинство указанных закономерностей качественно понятно из самого механизма захвата сталкивающихся капель. Первая капля, чтобы столкнуться со второй каплей-коллектором, должна сойти с линии тока, обтекающую вторую каплю. Если капля-коллектор значительно превосходит набегающую каплю, то их скорости движения сильно различаются. Время пребывания меньшей капли на линии тока большей капли мало. Наличие зарядов капель приводит к их кулоновскому притяжению. Меньшая капля сходит с линии тока, попадая на поверхность капли-коллектора.

Если же обе заряженные капли близкого размера, то они движутся с приблизительно одинаковыми скоростями, длительное время электрически взаимодействуя. Это увеличивает вероятность одной капли сойти с линии тока другой капли и слиться с ней.

Для ориентировки величин электрических зарядов капель, которые рассматриваются при электрической коагуляции, приведем рассчитанные предельные заряды капель в зависимости от их радиуса q пред (r). Значения этих зарядов получается из приравнивания удвоенной величины поверхностного натяжения сферической капли энергии электростатического поля при равномерном распределении заряда капли по ее поверхности. Электростатическая энергия заряженной капли сдерживается ее поверхностным натяжением.

Из такого приравнивания при поверхностном натяжении $75,7$ дин/см, $T = 0^\circ\text{C}$ находим предельный заряд капли (табл.4.4):

Таблица. 4.4

Предельный заряд капли в электронах

Радиус капли r , мкм	0,5	1	3	5	10
Предельный заряд капли, в электронах	$4,54 \times 10^4$	$1,28 \times 10^5$	$6,67 \times 10^5$	$1,44 \times 10^6$	$4,07 \times 10^6$

4.5. Результаты расчета роста радиуса заряженных капель, обусловленных их электрической коагуляцией

Расчеты столкновений заряженных аэрозольных частиц с облачными каплями, а, следовательно, и их рост, связанный с электрической коагуляцией, проведены по формуле (3.11) с K_t из работы [162].

$$N(r_1, q_1; r_2, q_2) = E(r_1, q_1; r_2, q_2) K_t n_1(r_1, q_1) n_2(r_2, q_2) \tau, \quad (4.1)$$

где E -коэффициент захвата; K_t - коэффициент турбулентности; r, q – радиусы и заряды сталкивающихся частиц; τ - время.

Отметим некоторые особенности этих расчетов. Коэффициент захвата E был взят, исходя из изложенного в табл. 4.2. Основными критериями выбора E как для разноименных, так и для одноименных заряженных капель были произведение зарядов сталкивающихся капель. Формула (4.1) относится только к парным столкновениям капель. По мере столкновений капель, приводящих к их слиянию, число еще не столкнувшихся капель уменьшается. Однако уменьшение числа сталкивающихся капель за счет уже столкнувшихся не учитывалось. Это было скомпенсировано выбором очень малого шага по времени (не более 0,5 с).

Если капля даже за указанный малый временной шаг расчета испытывала несколько столкновений, то это приводило к занижению числа столкновений. Учитывался только начальный радиус капли, который возрастал в зависимости от числа столкновений. Возможное значительное число столкновений могло изменить взятый первоначальный коэффициент захвата.

В самом начале столкновений капель были приняты во внимание наиболее вероятные столкновения: положительно заряженных капель с отрицательно заряженными. Количество столкновений отрицательно заряженных капель с каждым сортом положительных капель зависит от концентрации последних. Чтобы это учесть при распределении отрицательных капель на положительно заряженные капли, находились

весовые множители такого распределения. Сперва чисто формально рассчитывались столкновения полной концентрации отрицательно заряженных капель с каждым сортом положительных капель, как будто бы только такой сорт положительно заряженных капель существует. Затем эти столкновения суммировались, а далее находились весовые множители как отношение числа столкновений с выделенным сортом положительных капель к полному числу столкновений со всеми сортами положительных капель.

Из рассчитанного с весовым множителем истинного значения числа столкновений $N_{\text{столк}}$ при известной концентрации данного сорта положительных капель находилось отношение числа столкновений к концентрации положительных капель. Другими словами, количество отрицательных капель, попавших на одну положительную каплю. В случае, когда указанное отношение оказывается дробным, то концентрация положительно заряженных капель распределялась по целому числу столкновений. Так, например, для более двух, но менее трех столкновений: концентрация положительных капель с уменьшенным зарядом, равным двум отрицательным зарядам отрицательных капель, равнялась $3n(qe^+) - N_{\text{столк}}$, а с тремя столкновениями равнялась: $N_{\text{столк}} - 2n(qe^+)$, где $n(qe^+)$ – первоначальная концентрация положительно заряженных капель, а $N_{\text{столк}}$ – их число столкновений с отрицательными каплями. Аналогичные соотношения легко получить и для любого дробного значения столкновений.

Процесс столкновения капель сопровождался их конденсационным ростом и уменьшением их концентрации за счет турбулентной диффузии. Принимая во внимание соотношение между интенсивностями этих процессов, как обычно принято, по методу расщепления на физические процессы для каждого промежутка времени, был, прежде всего, оценен конденсационный рост капель, затем среднее уменьшение их концентрации в начале и в конце взятого временного интервала, наконец, электрическую коагуляцию.

В нашу задачу входит только показать, что искусственные заряженные капли, образовавшиеся с участием заряженных аэрозольных частиц, приводят даже в отрыве от неминуемого их взаимодействия с каплями естественной облачной среды к размерам, которые соответствуют гравитационной коагуляции и выпадению осадков.

В течение интервала 2,5-3с произойдет столкновение капель с зарядом, большим $272e+$ и отрицательных капель с зарядом большим $232e-$. С учетом диффузии в литре облачной среды сформируются положительные капли с концентрацией $2,53 \times 10^5 \text{ литр}^{-1}$ и радиусом 14,6 мкм. Таким образом, после введения в облако гигроскопического заряженного реагента в облачной среде формируется система: искусственно созданных положительно заряженных капель с зарядом $856-3880e$, концентрацией $2,53 \times 10^5 \text{ литр}^{-1}$, радиусом капель 14,7 мкм и отрицательно заряженных капель с зарядом более $332e$, концентрацией $0,2 \times 10^7$, радиусом капель 9,1 мкм, с одной стороны; с другой стороны, система облачных капель естественного происхождения с радиусами, большими по крайней мере 10 мкм, их концентрацией в несколько тысяч в литре облачной среды [162]. Считается, что облачные капли заряжены со средней величиной заряда, например $|q| = 10^{-4}R$, где R – радиус капли в см, а заряд q в системе СГСЕ. Следовательно, капля в 10 мкм несет заряд без указания его знака в 200 зарядов электрона.

Такая система капель в облаке не может не привести к гравитационной коагуляции и выпадению осадков [159]. Однако для их интенсивности, количества, продолжительности необходимо провести дополнительные исследования. Классический механизм осадкообразования работает при появлении кристаллической фазы в облаке.

4.6. Лабораторные исследования процессов кристаллизации переохлажденных капель ионами

Процессы кристаллизации переохлажденных капель ионами исследовались в лабораторных условиях по влиянию коронного разряда на температуру замерзания водяных капель [158,210,228]. Замораживались две капли дистиллированной воды радиусом 0,5-1,4 мм. На одну из медицинских игл, на которые были насажены замерзшие капли, подавалось положительное напряжение в 2-3 кВ, а другая игла заземлялась. Расстояние между ледяными частицами варьировалось. Между ледяными частицами возникал коронный разряд. Над положительно заряженной ледяной частицей на металлической нити была подвешена водяная капля. Исследовалась температура замерзания подвешенной капли в зависимости от ее расстояния до положительно заряженной частицы и от расстояния между коронирующими частицами.

Результаты исследований показали, что температура замерзания капли оказалась в пределах от $-1,5^{\circ}\text{C}$ до -20°C . Вместе с тем установлено, что температура замерзания капли повышалась как при уменьшении ее расстояния до положительно заряженной частицы, так и при уменьшении расстояния между коронирующими частицами. Замерзание капли при небольшой отрицательной температуре всегда начиналось с нижней части, обращенной к коронирующей частице.

Поскольку коронный разряд предполагает ионизацию воздушной среды, то исследования фактически сводятся к установлению эффекта действия ионов на температуру замерзания капли. Чем ближе коронирующие частицы, тем больше концентрация образовавшихся ионов; чем ближе капля к коронному разряду, тем большее количество ионов может попасть на ее поверхность.

Авторы [174] отмечают, что механизм влияния коронного разряда на температуру замерзания водяной капли изучен недостаточно. Однако сам факт замерзания капель в коронном разряде может иметь существенное

значение для процесса фазовых преобразований частиц в облаках [173]. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили влияние ионов на нуклеацию водных капель. Возможность этого влияния теоретически рассмотрена в работе [241], где изложен общий принцип учета влияния электрического поля на фазовый переход в рамках классической теории фазовых переходов. Эта теория позволяет связать статистическую характеристику фазового перехода – скорость нуклеации с измеряемыми параметрами системы в области физики облаков.

Из термодинамических соображений записывается разность свободных энергий конечного G_f и начального G_i состояний системы:

$$\Delta G = G_f - G_i = (\mu_f - \mu_i)n_v + \sigma_{fi}S + A_E, \quad A_E = A_{Ef} - A_{Ei}, \quad (4.2)$$

где μ – химический потенциал соответствующей фазы, n_v – число молекул в объеме зародыша, σ_{fi} – поверхностное натяжение на границе фаз f_i , S – площадь поверхности зародыша, A_E – член, учитывающий влияние электрического поля на величину ΔG . По смыслу самого выражения (4.2), A_E – разность энергий взаимодействия электрического поля с конечной A_{Ef} и начальной A_{Ei} фазами системы в объеме зародыша. Из общего принципа термодинамики известно, что всякая система развивается в направлении уменьшения ΔG . Очевидно, что при $A_{Ef} < A_{Ei}$, $A_E < 0$, то электрическое поле уменьшает ΔG , т.е. стимулирует фазовый переход; при $A_E > 0$ поле будет препятствовать переходу.

Общий вид A_E в (4.2) находится в полном соответствии с частным случаем влияния электрического поля иона на гомогенный фазовый переход водяной пар-вода, известный уже более 100 лет. Для понимания влияния электрического поля E на любой фазовый переход распишем подробно A_E применительно к упомянутому выше переходу.

$$A_E = \int_V \frac{E^2}{8\pi\epsilon_f} dV - \int_V \frac{E^2}{8\pi\epsilon_i} dV, \quad E = \frac{q}{r^2}, \quad (4.3)$$

где ϵ - диэлектрическая постоянная соответствующей фазы, q - заряд иона. Если a и r соответственно радиусы иона и зародыша, то

$$A_E = \frac{q^2}{2} \left\{ \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right) \left(\frac{1}{\epsilon_f} - \frac{1}{\epsilon_i} \right) \right\}, \quad a < r. \quad (4.4)$$

$\epsilon_i < \epsilon_f$, $A_E < 0$, электрическое поле иона стимулирует образование жидкой капли из водяного пара.

Еще нагляднее выглядит принцип стимулирования электрическим полем фазового перехода вода-лед, если фазы воды считать диэлектриками с жесткими диполями [203,249]. Тогда эффект поля проявляется в энергии связи диполей фаз с этим полем:

$$A_{E_k} = -E p_k \cos(\vec{E}, \vec{p}_k), \quad (4.5)$$

где p_k - величина дипольного момента соответствующей фазы. Чем сильнее связаны диполи в конечной фазе по сравнению с начальной, тем значительнее уменьшение работы образования зародыша. Система, таким образом, компенсирует часть величины самой системы, необходимой для образования зародыша новой фазы, для формирования границы фаз. Из (4.2)

$$A_E = \int_V E B dV, \quad B = -p_f \cos(\vec{E}, \vec{p}_f) + p_i \cos(\vec{E}, \vec{p}_i). \quad (4.6)$$

Влияние электрического поля иона на гомогенную кристаллизацию капель воды было рассчитано в соответствии с (4.2) при (4.6) двумя разными методами [89,267]. Расчеты показали, что облачные капли замерзают под влиянием адсорбированных ионов естественного атмосферного воздуха при температуре, начиная с -20°C . Проведенные расчеты могут претендовать на точность в той степени, в какой дипольные моменты полярных диэлектрических фаз воды можно аппроксимировать жесткими диполями с определенными их количественными значениями.

Установлено, что на гомогенную кристаллизацию воды может влиять электрическое поле иона радиуса $0,5 \times 10^{-8}$ см. Следовательно, даже при предельном значении напряженности поля в грозовых облаках до 15 кВ/см поле не может оказать прямого влияния на кристаллизацию облачных капель. Чтобы поле влияло на повышение температуры замерзания капель, его напряженность должна превосходить указанную выше величину приблизительно на 5 порядков.

Влияние электрического поля на гетерогенную кристаллизацию – образование сферического выпуклого ледяного зародыша из молекул водяного пара на твердой сферической частице – субстрате рассматривалось в [89,267]. Ион, оказавшийся в верхней части флуктуационно сформировавшегося из водяного пара ледяного комплекса, будет стабилизировать этот комплекс, реализуя фазовый переход водяной пар – лед. Но флуктуация комплекса, близкого к устойчивому, и попадание на этот комплекс иона – события, статистически независимые. Более вероятной представляется несколько иная кинетика образования ледяного зародыша из водяного пара. А именно, попадание ионов на флуктуационно образующиеся комплексы водяного пара, приводит к их стабилизации благодаря энергии взаимодействия иона с электрическими диполями льда, т.е. уменьшению их свободной энергии. В конечном итоге возрастает вероятность того, что отдельные комплексы дорастут до критических размеров при допустимых величинах краевого угла ледяного зародыша на субстрате α и отношения радиуса субстрата k к радиусу зародыша r . Расчеты показывают значительное увеличение α с уменьшением температуры, начиная с -5°C , при пересыщении над водой в 1%, когда происходит гетерогенный фазовый переход водяной пар-лед под влиянием адсорбированных ионов с радиусом $0,5 \times 10^{-8}$ см.

В [238] на основе упрощенных квантовохимических расчетов электрическое поле молекулярных ионов воздуха N_2^+ , O_2^+ и O_2^- представлено

как поле от трех областей – источников поля. Две сферические области положительного заряда локализованы вокруг атомных ядер этих молекул с рассчитанными радиусами $\cong 0,5 \times 10^{-8}$ см, а третья область находится между ними и не имеет простой геометрической формы. Результирующий эффект действия электрического поля от такой системы на фазовый переход не будет слабее, чем от одного источника в форме атомарного иона с радиусом $0,5 \times 10^{-8}$ см.

Принимая во внимание изложенные результаты исследований влияния электрического поля на фазовый переход с образованием ледяной фазы, соотнесем их с лабораторными наблюдениями замерзания капель вблизи коронного разряда. Очевидно, что сколько-нибудь строгое количественное объяснение этих экспериментов без точных характеристик аэрозольных частиц в холодильной камере (их радиуса, концентрации, величин краевого угла на их поверхности), а также степени перенасыщения водяного пара в камере не представляется возможным. Остается только дать качественное объяснение наблюдаемым фактам.

С положительным потенциалом 2-3 кВ, но без коронного разряда не наблюдается повышение температуры замерзания капель. Так и должно быть, поскольку напряженность постоянного электрического поля с таким потенциалом слишком мала (на несколько порядков меньше), чтобы стимулировать кристаллизацию. Замерзание капель происходило преимущественно при температуре выше -20°C . Как известно, гомогенная кристаллизация водяных капель при отсутствии электрического поля наблюдается при температуре -40°C . Под влиянием поля адсорбированных ионов температура гомогенной кристаллизации капель повышается до -20°C . Следовательно, почти все случаи замерзания капель должны быть отнесены к гетерогенной кристаллизации.

Гетерогенная кристаллизация может быть обусловлена попаданием на каплю ледяных частичек (контактная кристаллизация), либо отделившихся от

ледяных электродов, либо образовавшихся на аэрозолях по сублимационному механизму кристаллизации [196]. В пользу попадания оторвавшихся ледяных частичек свидетельствует повышение температуры замерзания капли, когда коронирующие частицы имели шероховатую поверхность. Уменьшение расстояния, как между коронирующими частицами, так и до капли повышало вероятность попадания оторвавшихся льдинок на каплю (и попасть на ближайшую часть поверхности капли, обращенную к коронирующей частице), что и приводило к повышению температуры замерзания. Более интенсивное коронирование увеличивало концентрацию ионов, увеличивало вероятность попадания ионов на аэрозоли, вызывая гетерогенную кристаллизацию. Значит, оно могло повысить температуру замерзания капли. Для окончательного установления происхождения ледяных частичек, обуславливающих замерзание капли, необходимы дополнительные экспериментальные исследования. Они должны, с одной стороны, проверить возможность отрыва ледяных частиц и их попадания на каплю, с другой стороны, установить, в какой мере эти частицы могут образовываться на аэрозолях в камере как на субстратах.

4.7. Кристаллизация переохлажденных облачных капель ионами

Один из основных способов искусственного вызывания осадков из смешанных облаков состоит в попытке инициировать образование льдообразующих частиц в переохлажденной части облака кристаллизующими реагентами, например йодистым серебром [79,80,196] и др. реагентами. Однако процесс возникновения кристаллической фазы в облаке начинается при температурном пороге действия реагента, составляющего для AgI -6°C (диспергируемые частицы порядка 10^{-6}см [196]). Активность других кристаллизующих реагентов проявляется при более низкой температуре окружающего воздуха. Это, с нашей точки зрения, является существенным недостатком в технологии ИВО в летний период, так

как мощные кучевые облака являются «теплыми», т.е. расположены ниже высоты расположения нулевой изотермы в атмосфере, тем более температуры порога действия кристаллизующих реагентов. Следовательно, засев облака необходимо проводить реагентами, способствующими росту облака выше расположения нулевой изотермы для инициирования механизма осадкообразования с участием ледяных кристаллов [89,90,91].

Среди различных механизмов льдообразования в облаках рассматривается и механизм влияния ионов на процесс нуклеации [237]. Этот механизм осуществляется путем: 1) захвата ионов переохлажденными каплями; 2) образованием зародыша кристаллической фазы в области адсорбированных ионов, обусловленной электрическим полем иона. Стимулирующая роль ионов в фазовых переходах отмечается в увеличении концентрации ледяных частиц в вершинной части облака по сравнению с содержанием льдообразующих ядер (ЛОЯ) в более низких слоях облака (по натурным измерениям) на несколько порядков [67]. Возможным объяснением такого различия является наличие положительных электрических зарядов на ЛОЯ в области вершины облака, что приводит к увеличению эффективности действия ЛОЯ [267].

Формирование электрического заряда в этой части, возможно, обусловлено нарушением циркуляции электрического цепи, поскольку электропроводность облачной среды на несколько порядков меньше, чем чистого атмосферного воздуха [172,268]. Счетчики ЛОЯ нейтрализуют электрический заряд прежде, чем фиксируется концентрация ЛОЯ. Особенности электрического действия, приводящего к увеличению льдообразующей эффективности ЛОЯ, в настоящее время подлежат дальнейшему изучению. По результатам лабораторных исследований некоторых авторов, были сделаны предположения о возможных механизмах такого влияния [203].

Температура замерзания переохлажденных капель радиуса 100-350 мкм значительно повышается при контакте с преимущественно отрицательно заряженными аморфными серными частицами. Эти же частицы без зарядов известны как малоэффективные ЛОЯ. Аналогичный эффект наблюдается и для отрицательно заряженных кристаллов. Механизмами действия заряженных аэрозолей может быть замерзание капель при контакте с ними (контактная нуклеация) или превращение аэрозольной частицы в ледяную путем процесса конденсация - замерзание.

Нуклеация льда наблюдается на субмикроскопических трещинах в кристаллах(каплях), в которых имеют место микромасштабные электрические поля (электрические заряды на противоположных стенках трещин в полярных кристаллах). В этих трещинах происходит упорядочение молекул воды (или зародыша ледяных кристаллов, меньшего критического размера), что способствует нуклеации льда. Такие микромасштабные электрические поля, вероятно, существуют в водяных пленках толщиной в несколько молекул и способствуют начальной конденсации на сильно заряженных ядрах. Эти же поля могут оказать мгновенное действие в точке контакта заряженного аэрозоля и водяной капли.

Отметим важность комбинации электрического поля и ламинарного потока для замерзания воды. Например, при контактной нуклеации, когда заряженная аэрозольная частица приближается к переохлажденной капле с противоположным или индуцированным зарядом, водяной поток образует "шейку" в области сильного электрического поля между ними [173]. В случае процесса "замерзание через конденсацию" дипольные молекулы воды будут притягиваться областями сильного электрического поля аэрозольной частицы и оседать на ее поверхности, растекаясь далее в форме ламинарного потока по этой поверхности.

Приведем значения коэффициента захвата для облачных капель при характерных зарядах на них: при радиусах капель 8,6-438 мкм коэффициент

захвата увеличивается на порядок; при радиусах, меньших 270 мкм, это увеличение достигает двух порядков. Таким образом, наличие зарядов на гидрометеорах приводит к значительному усилению процесса их коагуляции с последующим гравитационным оседанием.

Вместе с тем хорошо известно, что влияние электрического заряда иона может оказать заметное влияние на конденсацию водяного пара при пересыщениях $> 0,04\%$, что соответствует радиусу зародыша порядка 10^{-7} см. Типичное изменение во времени после начала конденсации распределения концентрации частиц по размерам с учетом перечисленных выше процессов показывает прежде всего значительное увеличение размера частиц при конденсации на ионах по сравнению с просто гомогенной конденсацией системы паров серной кислоты и воды. Уже через 300 с число аэрозолей с диаметром около 1 мкм достигает более 10 в см^3 , если конденсация стимулирована ионами. Отмечается возможность конденсации при наличии ионов при сравнительно низких относительных влажностях воздуха.

Чисто экспериментально определяется количество частиц размером порядка 10^{-7} см образующихся из смеси газов: SO_2 , H_2O и N_2 в [255]. Наблюдалось более интенсивное образование частиц на ионах (индуцированная ионами нуклеация) по сравнению с бинарной нуклеацией. При этом отрицательные ионы действуют сильнее положительных. Это свидетельствует о том, что первоначально присоединяются к иону молекулы H_2O .

Подчеркнем, что образующиеся частицы слишком малы, чтобы выступить в роли полноценных зародышей конденсационного роста капель. В соответствии с [216] конденсация пересыщенных: паров метанола и ацетоннитрила происходит преимущественно на положительных ионах.

Из рассмотренных экспериментов видно, что в разнообразных условиях роль электрических зарядов стимулирует конденсацию и

кристаллизацию, в частности, приводит к увеличению ледяной фазы в облаках.

Механизм образования ледяной фазы в облаках, обусловленный адсорбцией ионов переохлажденными каплями, изложен в [277]. Этот механизм включает попадание иона на поверхность капли и образование ледяного зародыша под влиянием электрического поля иона со значительно большей вероятностью, чем в отсутствие иона. Отсюда вытекает необходимость рассмотрения как кинетики попадания иона на поверхность капли, так и самой по себе адсорбции ионов различной химической природы водной поверхностью капли. Важно установить, останется ли ион на поверхности капли или перейдет с поверхности в ее объем. Ясно, что от особенности распределения заряда в капле зависит ее электрическое взаимодействие с другими гидрометеорами, прежде всего, процесс электрической коагуляции.

4.8. Влияние адсорбированных ионов на гомогенный механизм кристаллизации

Применительно к воздействиям на переохлажденную часть облака заряженным аэрозолем рассмотрим кратко влияние адсорбированных ионов на гомогенный механизм кристаллизации переохлажденных облачных капель и сублимационный механизм гетерогенной нуклеации льда на частицах в естественных условиях, выполненный в работе [93]. Теоретические расчёты для обоих механизмов удалось выполнить только на основе классических термодинамических представлений о фазовом переходе, дополненных элементами статистической физики. Установлена связь между статистической характеристикой (базового перехода - скоростью нуклеации (вероятностью фазового перехода и физическими параметрами системы ион - облачная капля (гомогенная нуклеация) или ион - краевой угол с радиусом субстрата (гетерогенная нуклеация). Значения физических параметров, описывающих фазовые переходы взяты из монографий [265].

Учёт действия электрического поля иона сводится к нахождению разности энергий взаимодействия поля с фазами воды как жёсткими молекулами-диполями. В известное выражение для работы образования зародыша добавляется эта разность взаимодействий. Если молекулы конечной фазы (лёд) сильнее связаны с полем иона, чем молекулы начальной фазы (вода, водяной пар), то разность энергий взаимодействия отрицательна, работа образования зародыша уменьшается - поле способствует фазовому переходу. Более сильная связь поля с молекулами начальной фазы препятствовала бы фазовому переходу. Заметим, что фазовый переход при наличии внешнего электрического поля есть переход при деформированных этим полем молекулярных структурах обеих фаз.

Электрическое поле атомных ионов как источников электрического поля отождествляется с полем точечного заряда, находящегося на расстоянии радиуса иона от поверхности кристаллического зародыша. Под радиусом иона понимаются радиус круговой орбиты, где максимальна вероятность пребывания электрона. Эти радиусы находятся из простейших квантовохимических представлений [233] с приближённой волновой функцией для отдельных электронов в форме Слэтера - Земера:

$$a_{nl} = n^2 a_0 / (Z - S_{\text{экp}}) \quad (4.7)$$

где a_{nl} - главные орбитальные квантовые числа; a_0 - борковский радиус, Z - порядковый номер атома (иона), $S_{\text{экp}}$ - величина экранирования выделенного электрона от ядра всеми остальными электронами. Приведём значения a_{nl} для некоторых ионов.

Ион	H	Li	Na	Cl	K	Cs
$a_{nl} 10^8 \text{ см}$	0,75	0,20	0,31	0,70	0,61	0,89

В случае гомогенной кристаллизации расчёты проведены для образования полусферического ледяного зародыша на поверхности

переохлаждённой водяной капли, где проявилось влияние электрического поля иона. На рис. 4.1 показан ледяной зародыш радиуса r , a - найденный радиус точечного иона с заданным зарядом, h_0 - толщина мономолекулярного поверхностного слоя жидкой и кристаллической фаз воды, где поле не ослабляется сильными диэлектриками ($\epsilon_{\text{вода}} \sim 90$, $\epsilon_{\text{лед}} \sim 100$), h_0 принято равным $3 \cdot 10^{-8}$ см. Из результатов расчётов следует, что облачная капля замерзает в течение 1с. при попадании на её поверхность иона радиуса $\sim 0,5 \cdot 10^{-8}$ см при $T = -20^\circ\text{C}$. Без влияния иона капля замерзает только при $T = -40^\circ\text{C}$.

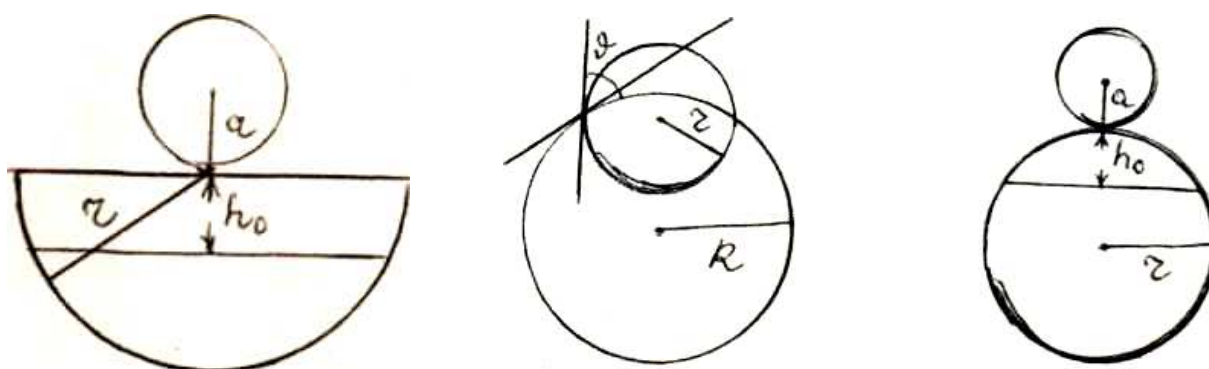


Рисунок. 4.1. Ледяной зародыш радиусом r

Влияние электрического поля иона на гетерогенную кристаллизацию оценивается на основании известного выражения для скорости сублимационного механизма гетерогенной нуклеации лишь с добавлением в экспоненту дополнительного члена. Этот член отражает взаимодействие поля иона с молекулами-диполями кристаллической фазы воды. Область роста молекулярных комплексов на субстрате и попадание иона в эту область являются, вообще говоря, событиями статистически независимыми.

Предполагается совпадение этих событий. Метод расчёта вероятности совпадения указанных событий пока не разработан. Нельзя исключить, однако, что действие поля иона при его приближении к поверхности субстрата приводит к увеличению концентрации водяного пара вблизи области потенциального ледяного зародыша. На рис.4.1. схематично показаны расположения выпуклого ледяного зародыша и положение иона на нём. R , r и a - радиусы сферического субстрата, зародыша и иона; ϑ - краевой угол. Расчёты гетерогенной нуклеации проведены для температур от -5° до -20°C , отношений радиусов сферического субстрата и гомогенного зародыша от 2 до 7, краевых углов до 40° и характерных пересыщениях водяного пара в облаках - 1,005 для радиуса иона $0,5 \cdot 10^{-8}$ см. Радиус ледяного зародыша при таких пересыщениях водяного пара уменьшается с понижением температуры от $1,6 \cdot 10^{-8}$ см до $0,46 \cdot 10^{-8}$ см. При краевом угле льда на частице реагента $\vartheta = 10^\circ$ кристаллизация наступает в течение 1с. без влияния поля. Ион обуславливает кристаллизацию за это время при $T = -5^\circ\text{C}$ до $\vartheta < 30^\circ$ для отношения $R/r \geq 2$; при $T = -10^\circ\text{C}$ до $\vartheta < 40^\circ$, при $T = -20^\circ\text{C}$ до $\vartheta \geq 40^\circ$.

Следовательно, остаётся подчеркнуть, что как для указанного выше механизма льдообразования, так и вообще для заряжения капель важное значение приобретает ориентация молекул-диполей в поверхностном слое жидкой и кристаллической фаз воды. Очевидно, что при такой ориентации взаимодействие иона с поверхностью воды и льда становится зависимым от знака иона. В [241,265] считается, что поверхностные диполи воды преимущественно направлены против внешней нормали к поверхности - протонами водорода внутрь объёма.

4.9. Кристаллизация капель с адсорбированными ионами

Попадание иона на каплю возможно как в кинетическом, так и в диффузионном режимах. Средняя тепловая скорость молекулярных ионов порядка 100 м/с, средняя длина свободного пробега их при атмосферном

давлении около 10^{-5} см (ионы в этих оценках отождествлялись с нейтральными молекулами). По [265], свободный электрон и первоначально образовавшийся с ним положительный ион в среднем не менее чем за 10^{-2} с присоединяют к себе 10-15 нейтральных молекул водяного пара - гидратируются, образуя сравнительно устойчивые комплексы - легкие атмосферные ионы. Таким образом, если ион образовался на расстоянии от капли, меньшем его длины свободного пробега, то он может попасть на каплю негидратированным - "чистым" за время порядка 10^{-9} с. Попавший на каплю ион в диффузионном режиме уже окружен гидратной оболочкой.

Этот механизм предполагает: 1) захват ионов переохлажденными облачными каплями; 2) образование зародыша кристаллической фазы в области адсорбированных ионов со значительно большей вероятностью, обусловленной электрическим полем иона. Формулы для расчета числа захваченных ионов каплями, как при отсутствии внешнего электрического поля, так и его наличии, приводились во многих исследованиях, начиная с 40-х годов [241, 260].

С физической точки зрения исследование влияния ионов на кристаллизацию означает установление связи между напряженностью электрического поля иона (его заряд и размер), физическими параметрами облачной капли и статистической характеристикой рассматриваемого процесса фазового перехода. Влияние электрического поля иона на фазовый переход вода – лед определяется величиной работы (A_E) образования кристаллического зародыша в жидкой фазе величиной [93]:

A_E/kT , где

$$A_E = \frac{\pi N \rho_3 q}{18} B_1 \left\{ h_0 \ln \left[1 + \frac{r^2 - h_0^2}{a^2 + h_0^2 + 2ah_0} \right] + \frac{a^2 + r^2}{2a} \ln \left(1 + \frac{2ah_0}{a^2 + r^2} \right) - 2a \ln \left(1 + \frac{h_0}{a} \right) + h_0 \right\}; \quad (4.8)$$

$A_E \rightarrow 0$ при $h_0 \rightarrow 0$, $r \rightarrow 0$, $a \rightarrow \infty$; k – постоянная Больцмана, T – температура, N – число Авагадро.

Из выражения (4.8) находится минимальный радиус кристаллического зародыша при наличии электрического поля иона r_E ;

$$\frac{dA_E}{dr} = \frac{\pi N \rho_3 q}{18} B_1 \frac{r}{a} \ln \left[1 + \frac{2ah_0}{a^2 + r^2} \right],$$

$$r_E = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12} + 2\sigma_{23} - \frac{N \rho_3 q}{36a} B_1 \ln \left[1 + \frac{2ah_0}{a^2 + r^2} \right]}{\rho_3 L \ln(T/T_0)}. \quad (4.9)$$

Из расчетов, проведенных в [93] следует, что при наличии ориентированных диполей-молекул в поверхностном слое воды и льда положительный ион существенно увеличивает вероятность кристаллизации. Отрицательный ион при такой ориентации существенно уменьшает вероятность кристаллизации. При отсутствии ориентации молекул воды знак иона не имеет значения, эффект действия поля иона промежуточный между положительным и отрицательным ионами при ориентации молекул воды.

Влияние электрического поля иона на вероятность кристаллизации существенно увеличивается с уменьшением его размера (радиуса) и с понижением температуры. При отсутствии поля иона вероятность кристаллизации резко уменьшается.

Для замерзания капли в течение 1 с необходимо выполнение условия:

$$Jn \frac{2}{3} \pi r^3 \geq 1, \quad (4.10)$$

где J – скорость нуклеации ($\text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$); n – число адсорбированных ионов на капле; r – радиус полусферического ледяного зародыша, образовавшегося на поверхности капли; $\frac{2}{3} \pi r^3 n$ – суммарный объем начальной фазы, в котором возможно образование кристаллического зародыша.

Максимальное число адсорбированных ионов n_{\max} зависит от радиуса капли [93] и может достигать 10^6 даже для мелких облачных капель в

грозовых облаках. Принимая во внимание при расчетах значения A/kT и n_{\max} , легко видеть, что для $T = -15^\circ\text{C}$ при наиболее благоприятных для фазового перехода ориентациях молекул на поверхностях воды и льда замерзают все капли, если радиус ионов меньше 10^{-7} см.

При коэффициенте поверхностного натяжения на границе вода—лед меньше 22 дин/см эффект действия поля иона резко возрастает. Например, при $\sigma_{23} = 9$ дин/см все капли должны замерзать в электрическом поле иона с $r < 10^{-7}$ см при сравнительно малых переохлаждениях. При не благоприятных условиях, когда $J_n < 1$, замерзает будет только часть капель.

Следовательно, установлена зависимость вероятности замерзания капель при данной температуре от размера иона, ориентации молекул в поверхностном слое воды и льда и числа адсорбированных на капле ионов.

4.10. Искусственная ионизация в облачной среде

Как следует из предыдущего подраздела, ионы стимулируют фазовый переход, приводящий к изменению естественного развития облачных процессов. В связи с этим необходимо оценить возможности искусственной ионизации облачной среды, принимая во внимание естественный ионный фон в атмосфере порядка 500-1000 ионов/см³ [174].

Возможность воздействия на облака заряженными частицами рассматривалась в ряде работ [79, 203, 212, 230]. В монографии [79] рассматривается воздействие электронными пучками из генераторов сильноточных релятивистских пучков как средство борьбы с грозами путем снижения напряженности электрического поля облаков до безопасных значений. Некоторыми авторами [230] предложен способ искусственного вызывания осадков (патент РФ № 2112360) на основе изучения влияния естественных потоков заряженных частиц в атмосфере на интенсивность осадков. Эти результаты показали, что потоки заряженных частиц играют

существенную роль в процессе образования осадков. В нижней атмосфере естественный поток заряженных частиц преимущественно космического излучения состоит в основном из электронов. Авторами способа предложено проводить вызывание осадков путем воздействия на облака потоками искусственного ионизирующего излучения. Поток заряженных частиц в облако генерируется ускорителем элементарных частиц весом 10 т, устанавливаемым на борту самолета, облетающего облако.

Заряженные частицы в атмосфере (электроны, генерируемые космическими лучами, радиоактивностью и другими факторами) являются основными источниками ионизации воздуха и играют существенную роль в процессе осадкообразования и грозового электричества в естественных условиях [38]. Влияние заряженных частиц на интенсивность осадков и развитие гроз в атмосфере рассматривалось в ряде работ [79, 173, 230 и др.]. Воннегут и Мур предложили воздействовать на электрическое состояние конвективных облаков внесением в них электрических зарядов, генерируемых коронированием с тонкой проволоки, находящейся под высоким напряжением. Колгейт осуществил подачу ионизированного воздуха в облако через полиэтиленовую трубу длиной 350м, находящуюся под напором воздуха, нагнетаемого мощным вентилятором [173]. По мнению авторов [203], среди современных методов искусственной ионизации облачной среды с учетом оперативности и безопасности для окружающей среды термоионизационные методы представляются наиболее перспективными. Термоионизационный метод (см Гл.5) ионизации облачной среды реализован в изобретениях [108, 109, 138].

Кинетика образовавшихся положительно заряженных 'твердых частиц и электронов предполагает, по крайней мере, захват заряженными частицами молекул кислорода и водяного пара (их гидратация), образование ионов, столкновение ионов с облачными каплями и аэрозольными частицами (зарядение частиц); действие зарядов на фазовый переход и электрическую

коагуляцию; рекомбинацию заряженных частиц в зависимости от их размеров.

4.11 Обоснование применения заряженных гигроскопических аэрозолей для искусственного вызывания осадков

Образованию осадков в облаках предшествует ряд физических и динамических процессов, в т.ч. процессы, приводящие к электризации облачных частиц [69, 174, 230]. В процессах электризации, наблюдаемых в облаках, всегда участвуют ионы – легкие или тяжелые, которые образуются естественным путем или генерируются искусственно при проведении работ по активным воздействиям [72, 79]. В воздухе могут образовываться также электроны, однако они, как и тяжелые ионы, непосредственно слабо влияют на процессы электризации облаков в целом. Процессы электризации в облаке, в которых участвуют ионы, происходят при контакте с частицами. Такой контакт обеспечивается диффузией ионов, влиянием электрического поля, свойствами поверхностного слоя частиц и другими факторами [69, 147, 148, 240 и др.].

Разработанный реагент [108, 113] предназначен, прежде всего, для вызывания осадков из теплых облаков, хотя может быть применен для этих целей и к переохлажденным жидко-капельным облачным системам. Рассмотрим физические принципы действия разработанного заряженного гигроскопического реагента для искусственного вызывания осадков из переохлажденных жидко-капельных облаков, которые наблюдаются в атмосфере в течении всего календарного года [50, 51, 57, 242]. Реагент образуется в результате сгорания пиротехнической смеси (ПС) специального химического состава, генерирующего гигроскопические соединения магния и калия. Физико-химические свойства реагента описаны в [87, 96, 97, 111], механизм действия в [120, 123, 124, 131 и др.].

Введение заряженного реагента в восходящий поток облака, в том числе и с его нижней границы осуществляется в макетах штатных пиропатронов ПВ-26. Методика введения реагента с нижней границы облака с использованием легкомоторных самолетов значительно уменьшает расходы на работы по проведению воздействий на облака с целью ИВО. Такая методика впервые была разработана под руководством Н.С.Шишкина [58] и реализована [116, 121, 151, 154].

Рассмотрим отдельные физические процессы, приводящие после введения реагента к образованию положительно заряженных гигроскопических частиц и отрицательных газовых ионов. Горение ПС при температуре до 3000 К приводит к термической возгонке компонентов смеси – твердая фаза смеси превращается в пар. Перемешиваясь с более холодным окружающим воздухом, пар конденсируется в форме твердых аэрозольных частиц радиусом 10^{-6} - 10^{-4} см. Основным механизмом электризации облачной среды будет термоэлектронная эмиссия с образовавшихся горячих частиц. Время термоэлектронной эмиссии с частиц – время сохранения их наибольшей температуры найдено модельными теоретическими расчетами [95, 124]. Расчеты выполнены с использованием математического аппарата, изложенного в [170, 216, 238, 240].

Для определенности расчеты продолжительности термоэлектронной эмиссии с горячих частиц t_{\min} и удаление их от траектории движения горячей ПС r_{\min} проведены для пиротехнической смеси пиропатронов, используемых для активных воздействий на облака. Это будут нижние оценки указанных величин, поскольку в модельных расчетах движению реального пространственно протяженного горящего источника поставлено в соответствие движение мгновенного точечного источника по траектории движения ПС с эквивалентной мощностью выброса тепла. Приведем входные параметры пиропатрона: вес – 40 г, теплотворная способность пиротехнического состава – 1000 кал/г, время горения – 18-20 с, скорость

движения по прямолинейной (для упрощения расчетов) траектории – $V = 10-50$ м/с. Температура конденсации парообразных компонентов смеси – температура образования твердых частиц – одновременно температура начала термоэлектронной эмиссии с этих части считалось равной 2000-1000 К. Коэффициент турбулентной диффузии переноса тепла для линейных масштабов пространственной области внутри инерционного интервала атмосферной турбулентности взят в форме Ричардсона. При указанных параметрах при $V = 10$ м/с $t_{\min} = 0,055-0,073$ с, $r_{\min} = 1,9-2,6$ см; при $V = 50$ м/с t_{\min} в 5 раз меньше, а $r_{\min} = 0,83-1,15$ см.

Количество электронов эмиссии очень сильно зависит от температуры и термоэлектронной работы выхода Φ для данного вещества. Сформировавшиеся эмитирующие частицы, как продукты сгорания пиросоставов, представляют собой различные соли и окислы. По экспериментальным данным, интервал Φ для солей 0,78- 5,14 эВ, для окислов 0,71-4,7 эВ. При средних значениях Φ и при $T = 2000-1500$ К количество электронов эмиссии с горячих частиц имеет порядок 10^{11} электронов для среднего радиуса сформировавшихся частиц [238].

Электроны эмиссии при неупругих столкновениях с молекулами кислорода образуют отрицательные ионы O_2^- [169]. Из всех механизмов образования O_2^- преобладающее значение имеет механизм тройного столкновения электрона с молекулой O_2 с передачей энергии какой-нибудь другой молекуле естественного атмосферного воздуха. Другая молекула получает энергию, равную энергии сродства молекулы O_2 к электрону. Зная концентрацию молекул азота, кислорода и водяного пара в воздухе при заданной температуре, легко установить, что в течение времени эмиссии все электроны столкнутся с молекулами O_2 , образуя ионы O_2^- .

Образовавшиеся в результате термоэлектронной эмиссии положительно заряженные гигроскопические частицы и отрицательные ионы O_2^- распространяются от траектории движения ПС все в более охлажденную

облачную среду. Расстояние, на котором повышение температуры составляет более 10°C , не превысит нескольких десятков см от траектории ПС. Остывшие гигроскопические частицы в облачной среде обводняются, превращаясь в зародыши заряженных капель. Ионы O_2^- , присоединяя десятки нейтральных молекул воздуха, превращаются в легкие ионы.

Нейтрализация заряженных частиц со средним радиусом 5×10^{-5} см легкими ионами обусловлена молекулярной диффузией ионов на частицы и направленным движением ионов к заряженным частицам. Изменение концентрации легких ионов во времени описывается достаточно простым дифференциальным уравнением типа Бернулли. Из анализа решения этого уравнения в предположении, что заряд частиц в процессе электронной эмиссии с них и непосредственной их нейтрализации ионами O_2^- не понизится в течение $\sim 0,5$ с более, чем на ~ 8 порядков, определяется сохранившийся заряд гигроскопических частиц и концентрация ионов O_2^- .

Таким образом в результате расчетов, в первые секунды горения пиросостава по траектории движения формируется система обводненных гигроскопических частиц с положительным зарядом около 300 зарядов электрона с концентрацией, равной $\cong 2 \times 10^4$ см^{-3} , а также отрицательных ионов O_2^- с концентрацией $\cong 6 \times 10^6$ см^{-3} .

Распространение такой системы в облаке приведет к появлению положительно заряженных, растущих на гигроскопических частицах облачных капель и отрицательно заряженных облачных капель, захвативших отрицательные ионы O_2^- . Электрически заряженные мелкие облачные капли в результате электрической коагуляции способны укрупняться до радиуса в 20 мкм [147, 173, 179, 212, 213]. Капли такого радиуса начинают расти благодаря гравитационной коагуляции, что ускоряет выпадение осадков.

В заключение этого подраздела подчеркнем, что основная трудность в понимании последовательности протекающих физических процессов, происходящих от введения в облако специально разработанного реагента до

выпадения осадков, относится исключительно к самой начальной стадии процессов – формированию в непосредственной близости от движения ПС заряженных гигроскопических частиц – твердых положительно заряженных частиц и отрицательных ионов O_2^- . Дальнейшие физические процессы, включающие распространение частиц и ионов в облаке, ионно-диффузионное зарядание облачных капель, конденсационно-коагуляционный рост облачных капель до размеров осадков в значительной степени изучены и изложены в [74, 88, 98, 181, 267 и др.]. Физические процессы действия заряженного гигроскопического реагента частично были установлены на основе физических закономерностей без математических расчетов и описаны в [69, 75, 83, 212].

Выводы к Главе 4

Приведено обоснование электрических методов воздействия на процессы облако и осадкообразования с учетом неустойчивости электрических процессов в облаках. Впервые рассматривать энергию неустойчивости электрического происхождения предложил И. М. Имянитов, который считал, что наряду с энергией термодинамической, фазовой и коллоидной неустойчивости в облаках может при известных обстоятельствах активно проявлять себя и энергия неустойчивости электрического происхождения. В каких именно процессах может проявляться эта энергия уточнений не было сделано, тем не менее, Илья Моисеевич усматривал возможности эффективного вмешательства в атмосферно-электрические процессы с доступной людям относительно малой энергией.

Проявление энергии неустойчивости электрического происхождения целесообразно представлять в виде энергии неустойчивости первого вида, которая проявляется при достижении предела Релея и второго вида, которая

проявляется в молниевых разрядах при накоплении критической величины электричества в отдельных объемах кучево-дождевого облака. Критическую величину энергии неустойчивости в атмосфере, приводящую к разряду электрической энергии целесообразно назвать электрической энергией неустойчивости имени И.М. Имянитова. Процесс накопления и разделения зарядов наблюдается в кучево-дождевых облаках в восходящих и нисходящих струях и термиках в результате укрупнения, дробления и испарения облачных капель и кристаллов. Средняя концентрация струй составляет 40 на 1 км² или 750 термиков в 1 км³ по данным исследований, проведенных в США. Соответственно, могут быть установлены критерии для выражения энергии неустойчивости электрического происхождения как предел Релея для капель и предельное количество электричества при грозовых разрядах, как предел Имянитова.

Мощные конвективные облака представляют собой неустойчивую коллоидную систему, находящуюся в метастабильном состоянии, чтобы вызвать осадки достаточно лишь небольшого внешнего воздействия. Применение электрически заряженной воды или электрически заряженных аэрозолей (гигроскопических ядер) оказывается более эффективным, чем применение незаряженных реагентов.

Возможны два пути такого вмешательства. Процессы конденсации и гравитационной коагуляции происходят на фоне электрических полей в атмосфере и образования электрических зарядов капель и кристаллов. Первый путь - это воздействие на сами электрические процессы в облаках, влияющие на фазовые и микроструктурные преобразования атмосферной влаги, с целью регулирования развития облаков. Электрические поля напряженностью более $3 \cdot 10^4$ В/м могут положить начало коагуляционного процесса в области прекращения конденсационного роста и при отсутствии гравитационной коагуляции. Однако, для реализации этого метода необходимы значительные водности (1г/м³ и более) и значительные поля

напряженностью 10^5 В/м. Искусственная генерация таких полей в больших объемах воздуха довольно сложна. Второй путь – это воздействие на микрофизические процессы в облаках различными реагентами, существенным образом изменяющие их электрическое состояние.

На основе этих положений рассматривается несколько методов воздействия электрическими методами: - воздействие электрическими методами на конденсационные процессы; - воздействие электрическими методами на процессы кристаллизации в облаках; - воздействие электрическими методами на процессы коагуляции частиц в облаках. Первые два способа основаны на использовании традиционных реагентов (CO_2 , AgI и др.) Третий способ позволяет видоизменить структуру теплого облака. Стимулирование осадков может быть достигнуто интенсификацией коагуляции при введении диспергированных капель воды или заряженного реагента в виде капель воды и растворов гигроскопических веществ (использовать баллоэлектрический эффект), или применением заряженного аэрозоля (ионов).

На основе известных теоретических принципов гомогенной кристаллизации, дополненных учетом взаимодействия электрического поля иона с жидкой и кристаллической фазами воды, установлена количественная связь между статистической характеристикой фазового перехода - скоростью нуклеации (число образовавшихся зародышей на поверхности капли в единицу времени) и физическими параметрами иона (его заряд и размеры) при заданной температуре капли.

Теоретические оценки показывают значительное влияние электрического поля иона на фазовый переход вода - лед, если принять, что электрическое поле без ослабления проникает как в жидкую, так и в кристаллическую фазы на глубину мономолекулярного слоя воды, равную $3 \cdot 10^{-8}$ см.

Скорость нуклеации J зависит, прежде всего, от размера иона (напряженности его электрического поля), определяющего величину показателя степени экспоненты в выражении для J . Число ионов на поверхности капли влияет на J значительно слабее — как простой множитель.

Для современных представлений об ориентации молекул-диполей на поверхности жидкой и кристаллической фаз воды расчеты показывают сильную зависимость влияния поля от знака иона, а именно превалирование влияния положительного иона над отрицательным. Отрицательные ионы гидратируются комплексами молекул водяного пара и проникают внутрь образовавшихся капель, ускоряя конденсационные процессы. Положительные ионы более эффективны при кристаллизации капель и образовании зародышей кристаллов.

Для ориентировки величин электрических зарядов капель, которые рассматриваются при электрической коагуляции, приведены рассчитанные предельные заряды капель (q) в зависимости от их радиуса (r). Значения этих зарядов получается из приравнивания удвоенной величины поверхностного натяжения сферической капли энергии электростатического поля при равномерном распределении зарядка капли по ее поверхности. Электростатическая энергия заряженной капли сдерживается ее поверхностным натяжением, приравнивания эти энергии при поверхностном натяжении $75,7$ дин/см и $T = 0^\circ\text{C}$ находим предельный заряд капли.

Приведенна формула для парных столкновений капель. По мере столкновений капель, приводящих к их слиянию, число еще не столкнувшихся капель уменьшается. Однако уменьшение числа сталкивающихся капель за счет уже столкнувшихся не учитывалось. Это было скомпенсировано выбором очень малого шага по времени ($0,5$ с).

В самом начале столкновений капель были приняты во внимание наиболее вероятные столкновения: положительно заряженных капель с

отрицательно заряженными. Количество столкновений отрицательно заряженных капель с каждым сортом положительных капель зависит от концентрации последних. Чтобы это учесть при распределении отрицательных капель на положительно заряженные капли, находились весовые множители такого распределения. Вначале формально рассчитывались столкновения полной концентрации отрицательно заряженных капель с каждым видом положительных капель, как будто бы только такой вид положительно заряженных капель существует. Затем эти столкновения суммировались, а далее находились весовые множители как отношение числа столкновений с выделенным видом положительных капель к полному числу столкновений со всеми видами положительных капель.

Из рассчитанного с весовым множителем истинного значения числа столкновений N при известной концентрации данного вида положительных капель находилось отношение числа столкновений к концентрации положительных капель. Другими словами, количество отрицательных капель, попавших на одну положительную каплю. Процесс столкновения капель сопровождался их конденсационным ростом и уменьшением их концентрации за счет турбулентной диффузии. Принимая во внимание соотношение между интенсивностями этих процессов, как обычно принято, по методу расщепления на физические процессы для каждого промежутка времени, был, прежде всего, оценен конденсационный рост капель. Затем оценивалось среднее уменьшение их концентрации в начале и в конце взятого временного интервала, наконец, электрическая коагуляция.

Искусственно заряженные капли, образовавшиеся с участием заряженных аэрозольных частиц, приводят даже в отрыве от неминуемого их взаимодействия с каплями естественной облачной среды к размерам ($r > 18 \mu\text{м}$), которые соответствуют электро- и гравитационной коагуляции с выпадением осадков.

Глава 5. Термоионизационный метод генерации заряженных аэрозольных частиц

5.1. Пиротехнический способ генерации заряженных аэрозолей

Анализ ресурсной облачности в пожароопасный период показал, что развитие конвекции в это время происходит преимущественно ниже уровня расположения нулевой изотермы в свободной атмосфере. В связи с этим крайне важно иметь реагент, который был бы не ограничен температурным порогом применения для активных воздействий на облака с целью искусственного регулирования осадков. Основным требованием к разработке таких реагентов с учетом пиротехнического метода генерации являлась универсальность, позволяющая формировать как отрицательные, так и положительные аэрозольные частицы, которые инициируют образование ядер конденсации, льдообразование при отрицательных температурах и процессы электрокоагуляции [167, 266]. Наличие таких реагентов позволяет исключить температурный порог активности применения реагента из технологии искусственного регулирования осадков. Это позволяет снять ограничения с высоты засева облаков, использовать дополнительное выделение скрытой теплоты конденсации водяного пара для более значительного увеличения энергии неустойчивости в облачной среде.

Практические возможности воздействия на облака твердыми наэлектризованными частицами рассматривались в прошлом столетии как теоретически [28, 144, 174], так и экспериментальным путем [31, 79, 158]. В результате лабораторных экспериментов было подтверждено, что диаметр заряженных частиц реагента увеличивается за счет электрокоагуляции с каплями воды от 5-10 мкм до 20-25 мкм [212]. Принципиальной разницы в механизме взаимодействия заряженных твердых и жидких частиц реагента с облачной средой не было обнаружено. Практическое использование заряженных твердых частиц связывалось с техническими трудностями доставки, а диспергирование реагента в виде жидкости - со сложностью

заряжания жидких частиц до определенных значений. Такими свойствами обладает, например, вещество, полученное после охлаждения раствора металлического натрия в расплавленном хлориде или при сжигании специальных составов [158, 212, 215]. Разработка искусственных источников ионизации основывалась на применении пиротехнического способа диспергирования реагента [87, 95, 96, 97, 111, 108, 109, 124, 125, 130 и др.].

Пиротехнический состав представляет собой смесь горючего и окислителя. Горючим являются различные металлы, окислителем - нитраты щелочных металлов. По патентам РФ [108,109] использовались магний и его сплавы, а также нитрат калия (калиевая селитра). Горение ПС при температуре до 4000-4500 К приводит к термической возгонке компонентов смеси – твердая фаза смеси превращается в пар. Перемешиваясь с более холодным окружающим воздухом, пар конденсируется в форме твердых аэрозольных частиц диаметром 0,0075- 0,75мкм. В результате горения происходит образование частиц радиусом 10^{-5} - 10^{-6} см. В [42] считается, что при такой температуре тепловая ионизация атмосферного воздуха незначительна. Действительно, средняя кинетическая энергия молекул воздуха при $T=3000$ К составляет около 0,4 эВ, т.е. значительно меньше ионизационных потенциалов, входящих в среду частиц (даже для цезия - 3,89 эВ). Доминирующим механизмом становится термическая ионизация горячих аэрозольных частиц. Эти частицы становятся источниками термоэлектронной эмиссии.

Твердые частицы являются более интенсивными источниками эмиссии, что связано с меньшим значением работы выхода электронов. Каждая нагретая твердая частица в результате эмиссии, приобретая положительный заряд, окружается электронным облаком с уменьшением его плотности по мере удаления от поверхности частицы. Электроны, в первую очередь наиболее удаленные, могут уйти из-под притяжения породившей их твердой частицы. Это произойдет при достижении

достаточной величины тепловой энергии электронов или под действием электрического поля других систем. Заметим, что автор [216] отмечает возможность влияния турбулентности воздушной среды на освобождение электронов. В атмосфере размер наименьших турбулентных пульсаций (микромасштаб турбулентности) значительно превышает размер электронной области, поэтому непосредственное влияние турбулентности на отделение электронов от положительно заряженной частицы будет сказываться при разделении положительно и отрицательно заряженных частиц в результате различной скорости свободного движения после инъекции.

Основным механизмом электризации облачной среды будет термоэлектронная эмиссия с образовавшихся горячих частиц. Расчеты продолжительности термоэлектронной эмиссии и удаление их от траектории движения горячей ПС приведены для пиропатронов, используемых для активных воздействий на облака. Это будут нижние оценки указанных величин, поскольку в модельных расчетах движению реального пространственно протяженного горящего источника поставлено в соответствие движение мгновенного точечного источника по траектории движения ПС с эквивалентной мощностью выброса тепла. Исходные параметры пиропатрона: вес – 40 г, теплотворная способность пиротехнического состава – 1000 кал/г, время горения – 18-20 с, установившаяся скорость движения по прямолинейной (для упрощения расчетов) траектории – $V = 50$ м/с. Температура конденсации парообразных компонентов смеси – температура образования твердых частиц – одновременно и температура начала термоэлектронной эмиссии с этих части считалось равной 2000-1000 К. Коэффициент турбулентной диффузии переноса тепла для линейных масштабов пространственной области внутри инерционного интервала атмосферной турбулентности взят из работы [170].

Количество электронов эмиссии очень сильно зависит от температуры и термоэлектронной работы выхода Φ для данного вещества. Сформировавшиеся эмитирующие частицы, как продукты сгорания пиросоставов, представляют собой различные соли и окислы. По экспериментальным данным, интервал Φ для солей 0,78- 5,14 эВ, для окислов 0,71-4,7 эВ. При средних значениях Φ и при $T = 2000-1500$ К количество электронов эмиссии с горячих частиц имеет порядок 10^{11} электронов для среднего радиуса сформировавшихся частиц [238].

Рассмотрим процесс формирования аэрозольных частиц с электрическими свойствами из парогазовой фазы. Аэрозольные частицы формируются в результате непосредственного превращения газ-частица из молекулярных комплексов по достижении ими критических размеров. При переходе из газообразного состояния в конденсированное молекулы различных веществ, оказавшись в новом состоянии, могут проявлять повышенную каталитическую активность, участвуя в процессах адсорбции на каталитических поверхностях, или хемсорбции в реакционно способной жидкой фазе, окружающей аэрозольную частицу.

Существует довольно удачная модель каталитической поверхности, при построении которой считается, что молекулы образуют локализованные кластеры с конкретными электрическими свойствами [216, 240]. Такая модель позволяет более детально понять факторы, ответственные за каталитическую активность поверхности. Более того, она наглядно свидетельствует о том, что кластеризованное состояние реактивов весьма характерно для свободной атмосферы, что малые и особенно изолированные ионные кластеры играют важную роль в атмосферных процессах, а понимание их состояния и реакционной способности имеет существенное значение для формирования ряда фундаментальных представлений, в частности, относительно электричества облаков и роли

гетерогенных процессов в формировании туманов и облаков различных форм [73, 94].

Электроны эмиссии при неупругих столкновениях с молекулами кислорода образуют отрицательные ионы O_2^- [216]. Из всех механизмов образования O_2^- преобладающее значение имеет механизм тройного столкновения электрона с молекулой O_2 с передачей энергии какой-нибудь другой молекуле естественного атмосферного воздуха. Другая молекула получает энергию, равную энергии сродства молекулы O_2 к электрону. Зная концентрацию молекул азота, кислорода и водяного пара в воздухе при заданной температуре, легко установить, что в течение времени эмиссии все электроны столкнутся с молекулами O_2 , образуя ионы O_2^- .

Образовавшиеся в результате термоэлектронной эмиссии положительно заряженные гигроскопические частицы и отрицательные ионы O_2^- распространяются от траектории движения ПС все в более охлажденную облачную среду. Расстояние, на котором повышение температуры составляет более $10^\circ C$, не превысит нескольких десятков см от траектории ПС. Остывшие гигроскопические частицы в облачной среде обводняются, превращаясь в зародыши заряженных капель. Ионы O_2^- , присоединяя десятки нейтральных молекул воздуха, превращаются в легкие ионы.

Нейтрализация заряженных частиц со средним радиусом 5×10^{-5} см легкими ионами обусловлена молекулярной диффузией ионов на частицы и направленным движением ионов к заряженным частицам. Изменение концентрации легких ионов во времени описывается достаточно простым дифференциальным уравнением типа Бернулли. Из анализа решения этого уравнения в предположении, что заряд частиц в процессе электронной эмиссии с них и непосредственной их нейтрализации ионами O_2^- не понизится в течение $\sim 0,5$ с более, чем на ~ 8 порядков, определяется сохранившийся заряд аэрозольных частиц и концентрация ионов O_2^- .

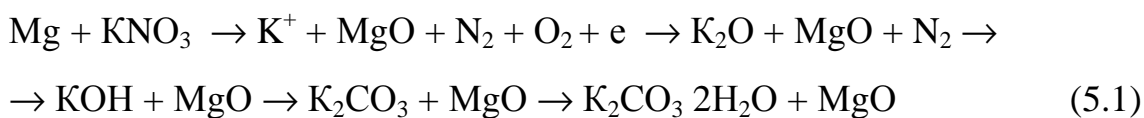
Распространение такой системы в облаке приведет к появлению положительно заряженных твердых ионов и отрицательно заряженных облачных капель, захвативших отрицательные ионы O_2^- . Электрически заряженные мелкие облачные капли в результате электрической коагуляции способны укрупняться до радиуса в 20 мкм [147, 173, 179, 212, 248 и др.]. Капли такого радиуса начинают расти благодаря гравитационной коагуляции, что ускоряет процесс образования осадков. При определенных условиях в атмосфере ионы способствуют превращению газа в аэрозольные частицы. При этом формируется электрический заряд атмосферного аэрозоля.

Разработка пиротехнических источников ионизации основывалась на ряде предположений. Основным из них является представление о разделении положительных и отрицательных зарядов в результате сгорания пиротехнической смеси в реальной атмосфере. Для этого в пиротехнический состав для генерации заряженного аэрозоля, состоящий из смеси порошкообразного металлического горючего и окисляющего вещества, вводятся небольшие добавки органического компонента [108, 109], который вводится с целью улучшения каких-либо свойств: снижения чувствительности к механическим воздействиям, улучшения воспламеняемости прессованных образцов, увеличения стойкости и т.п. С другой стороны, известно, что присутствие в пламени атомов углерода или водорода снижает концентрацию электронов и, следовательно, введение органических веществ в составы, образующие ионогенный аэрозоль, нецелесообразно. Однако введение нескольких весовых частей органических веществ увеличивает гигроскопичность образующегося аэрозоля. В связи с этим было исследовано влияние некоторых органических соединений на концентрацию пар-ионов, образующихся в пламени. Следует отметить, что введение исследованных органических соединений в двойную смесь порошка магния-нитрат щелочного металла,

как правило, улучшает воспламеняемость образцов и их горение протекает более спокойно и с меньшей скоростью.

Для исследования влияния органических соединений (карбамид, смола СФ-0112А, аминотетразол) на концентрацию носителей заряда в пламени в качестве модельных были выбраны смесь нитрата калия-магния с кислородным балансом двойной смеси «0» и «-10». Все исследованные органические соединения снижают концентрацию ионов в пламени двойной смеси с КБ=0 на всех расстояниях (~ 1 м) от горячей поверхности пиротехнического состава (ПС). При введении органических соединений в двойную смесь нитрата калия с магнием с кислородным балансом «-10» наблюдается несколько иная картина. Смола СФ-0112А и карбамид при содержании 1-5 весовых частей повышают концентрацию образующихся отрицательных ионов, а содержание карбомида от 10 до 18 частей увеличивает образование положительных ионов, при 22 и более весовых частях горение ПС не происходит [109]. Другим путем увеличения количества ионов в пламени является модифицирование поверхности металлического горючего в виде крупного порошка магния нанесением пленки различного химического состава, например содержащей гидроксильные радикалы, т.е. применение т.н. гидратированного магния. Для смеси нитрата калия и гидратированного магния происходит увеличение концентрации ионов в пламени для всех исследованных расстояний, причем концентрация ионов повышается на выходе из зоны пламени, т.е. с увеличением расстояния от ПС [87, 96, 97].

Схематично происходящие реакции при горении ПС в атмосфере можно представить следующим образом:



Все приведенные выше химические процессы (5.1) происходят с выделением тепла, значительно большим, чем при физическом процессе

взаимодействия продуктов реакции с водяным паром и сконденсированными каплями воды.

Сгорание пиротехнической смеси при температуре горения магния в воздухе 3000 - 4000 К приводит к образованию твердых аэрозольных частиц, которые представляют собой различные соли и окислы [42]. Результаты испытаний ПС в камере туманов приведены на рис.5.1. Твердые частицы аэрозоля, образовавшиеся в результате горения ПС, имеют размеры в диаметре от 0,0075 до 0,75 мкм.

Тепловая ионизация воздуха, включающего газы с достаточно большой величиной ионизационного потенциала будет очень незначительной. Основным механизмом ионизации облачной среды является термоэлектронная эмиссия с горячих аэрозольных частиц по траектории движения их источника - пиропатрона [108,109]. Общее количество электронов эмиссии определяется продолжительностью сохранения высокой температуры образовавшихся частиц, при которой еще продолжается электронная эмиссия.

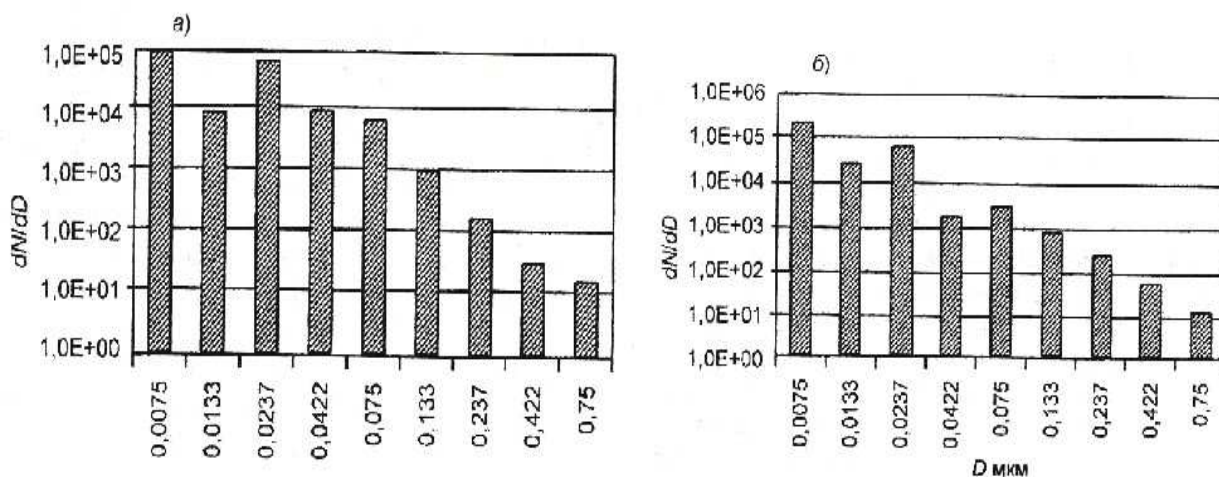


Рисунок 5.1. Плотность распределения частиц горения ПС по размерам в момент генерации (а) и после выдержки 30 мин (б).

Потеря электронов горячими частицами обуславливает их положительный заряд. Эмитировавшие электроны за счет кулоновского притяжения положительно заряженных частиц могут попасть на них, и их

положительный заряд. Сталкиваясь с окружающими молекулами кислорода воздуха, электроны способны образовать отрицательные газовые ионы. Прилипание электронов к молекулам кислорода происходит в тройных столкновениях $e + O_2 + M \rightarrow O_2^- + M$, при скорости реакции (5.2):

$$dn_e/dt = -k_m n_e N_{O_2} N_m, \quad (5.2)$$

где роль третьей частицы M выполняют преимущественно молекулы O_2 , N_2 и H_2O . Экспериментальные значения констант скоростей реакции k_m при комнатной температуре равны: $k_{O_2} = 2.5 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$, $k_{N_2} = 0.16 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$, $k_{H_2O} = 14 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$ [156].

Частота прилипания μ_a и соответствующее ей время жизни свободных электронов $\tau_a = 1/\mu_a$ в насыщенном водяным паром воздухе при давлении $P = 1013 \text{ гПа}$ и температуре $T = 273\text{К}$ находятся из выражения (5.3):

$$\mu_a = k_{O_2} (N_{O_2})^2 + k_{N_2} N_{O_2} N_{N_2} + k_{H_2O} N_{O_2} N_{H_2O} = 1.1 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}. \quad (5.3)$$

Здесь $N_{N_2} = 2.1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_{O_2} = 5.67 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_{H_2O} = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

В соответствии с полученным μ_a время жизни свободного электрона в конвективном облаке $\tau_a = 1/\mu_a = 0.9 \cdot 10^8 \text{ с}$. Таким образом, сгорание пиротехнической смеси приводит к образованию твердых аэрозольных гигроскопических частиц и отрицательных газовых ионов, заряжающих облачные капли. То и другое способствует конденсационно-коагуляционным и сублимационным процессам роста облачных капель, то есть стимулирует осадкообразование. Следует отметить, что отрицательные ионы значительно более эффективны, при положительных температурах в облаке, чем положительные [169].

В результате действия пиротехнического состава в атмосфере происходит образование заряженного гигроскопического аэрозоля и засев облака смешанными крупными и гигантскими ядрами конденсации, которые одновременно служат и ядрами кристаллизации, как только попадают в переохлажденную часть облака.

Введение органического вещества (карбамида) в смесь горючее-окислитель способствует при температуре 3000-4000°С разделению разноименно заряженных частиц в облачной среде. Скорость горения пиросостава уменьшается с увеличением концентрации карбамида и при 20 весовых частях и более горение прекращается. Пиротехническая смесь с 10 в.ч. карбамида и более [109] по экспериментальным данным, полученным в результате воздействий на развивающуюся конвективную облачность, генерирует больше положительных ионов, чем отрицательных, способствует развитию нисходящих движений в атмосфере и разрушению облака. При 5-9 в.ч. органического вещества в составе пиротехнической смеси [108] эффект противоположный: генерируется больше отрицательных ионов, конвективная облачность начинает бурно развиваться, переходит в кучево-дождевые формы, из которых выпадают ливневые дожди, в отдельных случаях град, если норма ввода реагента в облако превышает критическое значение.

Принимая во внимание рассмотренную выше качественно физическую картину образования искусственных ионов в облачной среде в результате сгорания пиротехнической смеси, произведем количественные расчеты образующихся положительных и отрицательных ионов. Как следует из предыдущей главы, ионы стимулируют фазовый переход, приводящий к изменению естественного развития облачных процессов. В связи с этим необходимо оценить возможности искусственной ионизации облачной среды, принимая во внимание естественный ионный фон в атмосфере порядка 500-1000 ионов/см³ [174].

Кинетика образовавшихся положительно заряженных твердых частиц и электронов предполагает, по крайней мере, захват заряженными частицами молекул кислорода и водяного пара (их гидратация), образование ионов, столкновение ионов с облачными каплями и аэрозольными частицами (заряжение частиц); действие зарядов на фазовый

переход и электрическую коагуляцию; рекомбинацию заряженных частиц в зависимости от их размеров.

По мнению авторов [203], среди современных методов искусственной ионизации облачной среды с учетом оперативности и безопасности для окружающей среды термоионизационные методы представляются наиболее перспективными.

5.2. Продолжительность сохранения температуры горячих частиц

Эмитирующие горячие частицы – продукты горения ШАД - образуются по траектории движения ШАД. Продолжительность сохранения высокой температуры частиц соответствует времени их термоэлектронной эмиссии.

Схематизируем постановку задачи, принимая во внимание, что пространственно-временное изменение любой субстанции может быть рассчитано только от набора точечных мгновенных источников. Тепловому источнику в форме пламени от заднего сечения ШАД поставим в соответствие набор мгновенных точечных источников выброса тепла, распределенных по площади этого сечения. Для простоты считаем сечение квадрата со стороной длины L . Источник движется с постоянной скоростью V по оси Oz декартовой системы координат, проходящей через центр квадрата; суммарный выброс тепла Q происходит в течение времени t_Q . Требуется найти продолжительность сохранения фиксированного уровня температуры T в точке с координатами: $x, y, z = 0$.

Приращение температуры в точке с координатами: $x, y, z = v\tau$ в момент времени t от мгновенного точечного источника площади $\Delta x \Delta y$ с выбросом в момент τ , расположенного в точке с координатами: x', y' на площади сечения пиропатрона будет:

$$\Delta T' = (x, y, z = v\tau; t - \tau) = C \frac{\Delta x \Delta y}{(t - \tau)^{3/2} L^2} \exp \left\{ - \frac{(x - x')^2 + (y - y')^2 + v^2 \tau^2}{4K(t - \tau)} \right\} \Delta \tau$$

(5.4)

$$C = \frac{Q}{c_p \rho t_Q (4\pi K)^{3/2}},$$

где c_p - теплоемкость воздуха при постоянном давлении, ρ - его плотность, K – коэффициент температуропроводности – диффузии тепла, νt - расстояние, на которое удалился источник по оси Oz от точки с $z = 0$, где фиксируется приращение температуры.

Суммируем действие всех источников с момента времени $\tau = 0$ (выброс в начальный момент) до $\tau = t$ (выброс до момента фиксированного приращения $\Delta T'$), т.е. интегрируем правую часть (5.4) по τ в указанных пределах. Выполняя интегрирование с заменой переменных сперва $t - \tau = \xi$, а затем $u = \xi^{-1/2}$, получаем:

$$\Delta T' = (x, y, z = 0; t) = 2C \frac{\Delta x \Delta y}{L^2} \exp\left\{\frac{v^2 \tau^2}{2K}\right\} \int_{t^{-1/2}}^{\infty} \exp\left\{-Au^2 - \frac{B}{u^2}\right\} du, \quad (5.5)$$

$$\text{где } A = \frac{(x - x')^2 + (y - y')^2 + v^2 \tau^2}{4K}, \quad B = \frac{v^2}{4K}.$$

Заданное приращение температуры воздушной среды удерживается в течение времени t , что соответствует удалению теплового источника на расстояние νt от точки $z = 0$. Чтобы получить в аналитической форме выражение для полного приращения температуры, нужно представить интеграл в (5.5) в пределах от 0 до ∞ и от 0 до $t^{-1/2}$. Подынтегральная функция имеет максимум в точке $u = (B/A)^{1/4}$. При:

$$(x - x')^2 + (y - y')^2 \ll v^2 \tau^2, \quad (B/A)^{1/4} = \frac{1}{\sqrt{t}}. \quad (5.6)$$

С учетом (5.6) и при $t < 1$, $B > A$. Значит, подынтегральная функция уменьшается от точки максимума и быстрее в интервале $u < \frac{1}{\sqrt{t}}$ по сравнению с ее уменьшением в интервале при $u > \frac{1}{\sqrt{t}}$. Следовательно,

$$\begin{aligned} \int_{t^{-1/2}}^{\infty} \exp\left\{-Au^2 - \frac{B}{u^2}\right\} du &> \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp\left\{-Au^2 - \frac{B}{u^2}\right\} du = \\ &= \frac{\sqrt{xK}}{vt} \exp\left\{-\frac{v^2 t}{2K}\right\} \exp\left\{-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4Kt}\right\} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Остается проинтегрировать по всем источникам на площади квадрата L^2 .

$$\begin{aligned} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \exp\left\{-\frac{(x-x')^2}{4Kt}\right\} dx' \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \exp\left\{-\frac{(y-y')^2}{4Kt}\right\} dy' = \\ = \pi Kt \left\{ \Phi\left(\frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{4Kt}}\right) + \Phi\left(\frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{4Kt}}\right) \right\} \left\{ \Phi\left(\frac{\frac{L}{2} - y}{\sqrt{4Kt}}\right) + \Phi\left(\frac{\frac{L}{2} + y}{\sqrt{4Kt}}\right) \right\}, \end{aligned} \quad (5.8)$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ - функция Лапласа.

Запишем из (5.4)–(5.8) окончательные выражения для приращения температуры, которые с учетом неравенства (5.7) являются нижними оценками. Если приращение температуры обозначается со штрихом, то сама температура будет равна $T' + 273\text{K}$.

$$T' = (x = y = z = 0; t) = \frac{\alpha Q}{2c_p \rho t_Q v L^2} \left[\Phi\left(\frac{L}{2\sqrt{4Kt}}\right) \right]^2; \quad (5.9)$$

$$T' = \left(x = y = \frac{L}{2}, z = 0; t\right) = \frac{\alpha Q}{8c_p \rho t_Q v L^2} \left[\Phi\left(\frac{L}{\sqrt{4Kt}}\right) \right]^2. \quad (5.10)$$

Заметим, что мощность выброса мгновенного точечного источника M , которая должна была бы входить в исходное выражение (5.4), заменяется на Q/t_Q . Далее будем считать, что $M = \alpha Q/t_Q$, α – некоторый множитель, который добавлен в (5.9) и (5.10). Значение его будет установлено ниже.

Величина α устанавливается из очевидных соображений. Максимальная температура воздушной среды не может превосходить максимальную температуру источника тепла – горячей ШАД. Эта максимальная температура будет на оси Oz в момент прохождения модельным плоскостным источником тепла точки с $z = 0$ или при $t \rightarrow 0$. Если считать для определенности температуру воздушной среды равной 273К, то перегрев при температуре горения в центре ШАД 3000К будет $T' = 2727$ К.

Подставляя в (5.9) значения параметров горячей ШАД весом 40г: $Q = 4 \times 10^4$ кал, $t_Q = 18$ с, $L = 2$ см, а также $c_p = 0,24$ кал/г град, $\rho(T) = 1,2 \cdot 10^{-3} 273/T$ г/см³; находим величины α , зависящие только от скорости движения ШАД. В частности, $\alpha (v = 10 \text{ м/с}) = 0,257$; $\alpha (v = 39 \text{ м/с}) = 1$; $\alpha (v = 50 \text{ м/с}) = 1,285$. Таким образом, с уменьшением мощности выброса точечного источника на единицу длины его пути $Q/t_Q v$ возрастает коэффициент пропорциональности между этим выбросом тепла и мощностью поставленных ему в соответствие мгновенных точечных источников на модельной плоскости.

Как видно из (5.9) и (5.10), приращение температуры определяется прежде всего основной характеристикой теплового источника – комбинацией $Q/t_Q v$. При всех постоянных значениях параметров источника, включая его скорость, T' убывает как с ростом коэффициента диффузии тепла, так и со временем. Диффузионное рассеяние тепла со временем оказывает все большее влияние по сравнению с его приростом от уже достаточно удаленного источника. Уменьшается T' и с возрастанием площади источника L^2 .

Полагаем, что температура конденсации парообразной среды продуктов сгорания пиротехнических смесей должна быть, по крайней мере, на 1000К меньше температуры горения в центре пламени – 3000К. Рассчитаем по формулам (5.9) и (5.10) предельные времена t_{np} – продолжительности существования трех уровней температур, при которых может происходить термоэлектронная эмиссия с горячих образовавшихся частиц.

Коэффициент турбулентности диффузии $K(l)$ переноса тепла для линейного масштаба пространственной области l возьмем в форме Ричардсона с экспериментальным значением 0,2 [170], отдавая себе отчет в такой грубой оценке $K(l)$. Линейная протяженность воздушной области, рассеивающей тепло за предельное время t_{np} , определяется скоростью движения источника.

$$K(l) = 0,2l^{4/3} \text{ см}^2/\text{с}, \quad l = vt_{np}, \text{ см} \quad (5.11)$$

$K(l)$, взятое фактически для t_{np} , будет заведомо верхней оценкой коэффициента диффузии тепла, поскольку для всех меньших расстояний l при $t < t_{np}$, которое проходит источник, $K(l)$ будет меньше. Поэтому вычисленные t_{np} будут нижней оценкой соответствующих T' из (5.10) как из-за $K(l)$, так и самого коэффициента, стоящего перед функцией Лапласа, полученного с учетом (5.6).

Ввиду решающей роли величины t_{np} для рассмотренных далее процессов эмиссии электронов и заряда эмитирующих частиц проведем расчеты и со средним значением коэффициента турбулентной диффузии в интервале времени t_{np} .

$$K(l) = \frac{0,2}{l} \int_0^l l^{4/3} dl = 0,086 l^{4/3} \quad (5.12)$$

Рассчитанные значения нижних оценок t_{np} на оси Oz для уровней T в зависимости от скорости движения ШАД приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Продолжительность сохранения уровня температуры (ΔT) t_{np} на оси Oz в зависимости от скорости источника v при двух формах коэффициента турбулентной диффузии $K(l)$. Верхние значения относятся к $K(l) = 0,2 l^{4/3}$, нижние – $K(l) = 0,86 l^{4/3}$, \bar{t}_{np} – среднее значение.

$\Delta T, K$	2000		1500		1000		1	
$v, мс$	10	50	10	50	10	50	10	50
$t_{np}, с$	0,017	0,008	0,024	0,010	0,031	0,012	0,50	0,20
	0,025	0,011	0,035	0,014	0,045	0,019	0,72	0,29
$\bar{t}_{np}, с$	0,021	0,009	0,029	0,011	0,038	0,015	0,61	0,24

Величина t_{np} с $K(l)$ следует считать несколько завышенными. Ближе всего к истинным значениям t_{np} будут, по-видимому, их средние значения \bar{t}_{np} , вычисленные с коэффициентами диффузии (5.11), (5.12). Практическое выравнивание температуры (ее превышение на 1К по отношению к температуре естественной атмосферной среды) происходит быстрее, чем за одну секунду.

Из (5.10), принимая во внимание, что функция Лапласа не превосходит 1, находим приращение температуры T' ($x = y = 4/2; t \rightarrow 0$) < 420К. Температура воздушной среды резко уменьшается при удалении от центра квадрата с $T = 3000K$ (ось z) до 690К ($x = y = 4/2$).

5.3. Электроны эмиссии с образовавшихся горячих частиц

Продукты сгорания пиротехнических составов представляют собой различные соли и окислы [96]. По электрическим свойствам эти вещества должны быть полупроводниками. Теория термоэлектронной эмиссии применительно к полупроводникам с сильно упрощающими предположениями изложена в [19]. Эти предположения включают, во-первых, изотропный параболический закон дисперсии для электронов – зависимость энергии электрона E от импульса p .

$$E = E_0 + \frac{p^2}{2m}, \quad (5.13)$$

здесь E_0 – энергия покоящегося электрона в воздушной среде, $m = 9,11 \times 10^{-28}$ г – его масса. Во-вторых, полупроводник является невырожденным.

$$\exp\left\{\frac{E_0 - F}{kT}\right\} \gg 1, \quad (5.14)$$

где F – значение энергетического уровня Ферми в полупроводнике, $k = 1,38 \times 10^{-16}$ эрг/град – постоянная Больцмана. Тогда электроны эмиссии в непосредственной близости от поверхности эмитирующих частиц подчиняются распределению Максвелла по скоростям [244]. Концентрация электронов эмиссии в воздушной среде у поверхности частиц в зависимости от температуры и термоэлектронной работы выхода $\Phi = E_0 - F$ выражается как:

$$n_s = 4\sqrt{2} \left(\frac{\pi m k T}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left\{-\frac{\Phi}{kT}\right\} = 4,81 \cdot 10^{15} T^{3/2} \exp\left\{-\frac{\Phi}{kT}\right\} \text{ электр./см}^3, \quad (5.15)$$

где $h = 6,62 \times 10^{-27}$ эрг сек – постоянная Планка.

Интервал значений Φ для солей: 0,78-5,14 эВ, для окислов: 0,71-4,7 эВ [238]. Табл.5.2 иллюстрирует просто сильную зависимость n_s от T и Φ . Здесь не принимается во внимание действие положительного заряда частиц после начала эмиссии электронов, электрическое поле которого препятствует удалению электронов от поверхности частицы, возвращая вылетевшие электроны назад в объем частицы.

Таблица 5.2 Концентрация электронов эмиссии n_s , см³

T, K $\Phi, В$	2000	1500	1000	700
5,14	$4,93 \times 10^7$	$1,56 \times 10^3$	$2,0 \times 10^{-6}$	0
4,0	$3,66 \times 10^{10}$	$2,17 \times 10^7$	1,10	0
3,0	$1,20 \times 10^{13}$	$2,38 \times 10^{10}$	$1,19 \times 10^5$	$2,34 \times 10^{-2}$
1,8	$1,26 \times 10^{16}$	$2,53 \times 10^{14}$	$1,31 \times 10^{11}$	$1,00 \times 10^7$
1,25	$3,06 \times 10^{17}$	$1,78 \times 10^{16}$	$7,72 \times 10^{13}$	$9,08 \times 10^{10}$
0,71	$7,05 \times 10^{18}$	$1,15 \times 10^{18}$	$4,05 \times 10^{16}$	$9,96 \times 10^{14}$

Количество электронов эмиссии $N_э$ с горячих частиц за время их эмиссии t_{np} обычно записывается, например [19], как:

$$N_э = \frac{1}{4} n_э \bar{v}_T S_p t_{np}, \quad (5.16)$$

где \bar{v}_T – средняя тепловая скорость электрона, S_p – площадь поверхности частицы.

Формула (5.16) предполагает, что электроны с любой скоростью способны покинуть эмитирующую частицу. Суммирование производится по всем равноправным электронам с приписыванием им одинаковой средней скорости. Однако по мере эмиссии электронов частица приобретает все больший положительный заряд, электрическое поле которого должны преодолевать электроны, чтобы покинуть частицу. После прекращения эмиссии положительный заряд частицы достигает наибольшего значения. Для его преодоления потребовалось бы большая величина кинетической энергии электрона, чем эта энергия в течение времени эмиссии с меньшим числом испущенных электронов – с меньшим положительным зарядом частицы.

Пусть окончательный заряд частицы соответствует испусканию $N_э$ электронов. Тогда частицу за все время эмиссии заведомо покинут электроны, имеющие минимальную скорость $v_{T,0}$ при условии:

$$\frac{m v_{T,0}^2}{2} > \frac{eq}{r}, \quad q = eN_э, \quad N_э < 0,987 \cdot 10^{-13} v_{T,0}^2, \quad (5.17)$$

если радиус частицы взят $r = 5 \times 10^{-5}$ см, а количественное значение заряда электрона $e = 4,8 \times 10^{-10}$ СГСЕ. Таким образом, полное число электронов эмиссии будет включать спектр их скоростей от $v_{T,0}$ до ∞ .

При максвелловском распределении электронов по скоростям v_T плотность функции распределения можно записать в виде

$$f(u) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2, \quad u = \frac{v_T}{v_э}, \quad v_э = 0,881 \bar{v}_T, \quad (5.18)$$

где v_e – наиболее вероятная скорость электронов. Принимая во внимание (5.18), выражение для полного количества вылетевших электронов вместо (5.16) будет

$$N_2 = \frac{1}{4} n_{\text{э}} S_p t_{np} \frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_{u_0}^{\infty} v_T e^{-u^2} u^2 du, \quad u_0 = \frac{v_{T,0}}{v_e}. \quad (5.19)$$

В (5.19) упрощенное произведение $n_{\text{э}} \bar{v}_T$ из (5.16) заменяется более точным выражением для потока электронов эмиссии с учетом распределения электронов по скоростям (5.18).

Остается подчеркнуть, что $N_{\text{э}}$ в (5.19) является оценкой числа электронов эмиссии снизу, поскольку учитываются только электроны с минимальной скоростью $v_{T,0}$. В то время как в процессе эмиссии при меньшем заряде частицы электроны покидают частицу при скоростях, меньших $v_{T,0}$. Для определения $N_{\text{э}}$ в (5.19) устанавливаем величину $v_{T,0}$, приравняв выражения для $N_{\text{э}}$ из (5.17) и (5.19).

Преобразовывая интеграл в (5.19), получаем уравнение для $v_{T,0}$.

$$0,987 v_e^2 u_0^2 10^{-13} = \frac{1}{4} \pi 10^{-8} n_{\text{э}} t_{np} v_e \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(u_0^2 e^{-u_0^2} + u_0 e^{-u_0^2} \right) + 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{u_0} e^{-u^2} du \right\}$$

или

$$\frac{1}{2} e^{-u_0^2} \frac{1+u_0}{u_0} + \frac{0,443}{u_0^2} [1 - \Phi(u_0)] = 0,557 \cdot 10^{-5} \frac{v_b}{t_{np} n_{\text{э}}}, \quad (5.20)$$

где $\Phi(u_0)$ – функция Лапласа (5.8). Для данной температуры рассчитываем v_e из (5.16) и (5.18). Из (5.20) находим u_0 и из (5.19) – $v_{T,0}$. Наконец, с найденным $v_{T,0}$ получаем $N_{\text{э}}$ из (5.17).

Результаты расчетов количества электронов эмиссии $N_{\text{э}}$ в зависимости от температуры частиц с $r = 5 \times 10^{-5}$ см, их термоэлектронной работы выхода, а также параметров источника, определяющих предельное время эмиссии, показывают, что количество электронов на несколько порядков меньше, чем при расчетах, приведенных в табл.2.

5.4. Реакции образования отрицательных ионов электронами эмиссии

Обратимся к судьбе электронов эмиссии, оказавшихся в естественной атмосферной среде. Различные реакции образования отрицательных ионов в результате неупругого столкновения электронов с газовыми молекулами детально рассмотрены в [216], а также схематично перечислены в [144]. Применительно к плотной газовой среде и величинам энергий электронов эмиссии решающее значение будет иметь реакция тройного столкновения с образованием отрицательных ионов молекул кислорода (отрицательных ионов молекул азота не существует).

Электрон сталкивается и захватывается молекулой O_2 с одновременным столкновением с какой-либо молекулой атмосферного воздуха: азота, кислорода или водяного пара. Захваченный молекулой O_2 электрон теряет энергию, равную энергии сродства электрона к этой молекуле E_c . Чтобы не нарушался закон сохранения энергии, эту энергию E_c нужно отдать, в частности, третьему телу. Без третьего тела образовавшийся на короткое время отрицательный ион O_2^- был бы неустойчивым – произошел бы автоотрыв электрона.

Схематично реакцию тройного столкновения запишем как:



где Y означает другую молекулу: N_2 , O_2 , H_2O , которая отбирает энергию E_c .

Если n^- – концентрация образовавшихся отрицательных ионов молекул O_2 за время эмиссии электронов t_{np} , то

$$n^- = K_t n n_t n_e t_{np}, \quad (5.22)$$

где K_t – константа тройного столкновения; n , n_t и n_e – соответственно концентрации молекул кислорода, третьего тела и электронов.

Не вдаваясь в детали механизма образования ионов O_2^- , приведем только само значение K_t для энергий электронов эмиссии до 1 эВ. Оценка $K_t \sim 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$ может быть получена из простых теоретических соображений

механизма тройного столкновения. По экспериментальным данным константа этой реакции имеет тот же порядок при слабой зависимости от энергии электронов.

Средняя длина свободного пробега электронов до столкновения их с молекулами азота, кислорода и даже водяного пара при концентрациях этих газов во время эмиссии электронов соответственно $0,25 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$; $0,67 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $0,26 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ значительно меньше длины свободного пробега до столкновения с эмитирующими частицами. При этом концентрация частиц n_p со средним радиусом $5 \times 10^{-5} \text{ см}$ должна быть много меньше $\sim 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Как будет видно из дальнейших расчетов, n_p полностью отвечает этому требованию, табл.5.4. Из (5.22) при указанных выше величинах K_t и $n_t > 1$; значит, все электроны эмиссии пошли на образование отрицательных молекул кислорода.

Известно, что в естественном атмосферном воздухе образовавшиеся мономолекулярные ионы, в частности ионы молекул кислорода, «практически мгновенно» [233] присоединяют 10-15 нейтральных молекул, превращаясь в устойчивые комплексы – легкие ионы. В [174] утверждается, что процесс образования легких ионов из мономолекулярных ионов составляет по времени менее 10^{-2} с .

Перенесем это с естественных температурных условий в атмосфере на температуру до 2000К. При столь высокой температуре сохраняется достаточно высокая плотность атмосферного воздуха при бóльшей тепловой скорости молекул. Частота столкновений молекул с ионами остается еще очень высокой. Это дает основание считать, что и при столь высоких температурах все отрицательные ионы O_2^- , захватывая нейтральные молекулы, станут центрами легких ионов.

5.5. Взаимодействие легких ионов с частицами – продуктами сгорания пиротехнического состава

Как уже было сказано ранее, твердые горячие частицы радиуса 10^{-6} - 10^{-4} см образуются термоконденсационным способом. Пока неизвестная сколько-нибудь точно температура конденсации частиц должна быть, во всяком случае, значительно ниже температуры горения пиросостава. Так при температуре горения в центре модельного плоскостного источника до 3000К температуру конденсации частиц для определенности считаем не превышающей 2000К. Это и будет температура термоэлектронной эмиссии с горячих частиц.

Найденная температура горения в крайних угловых точках модельного источника оказалась не более 690К. А температура конденсации должна быть еще ниже. При такой сравнительно низкой температуре частиц эмиссия с них, сильно зависящая от T , (5.15) и табл. 5.2, будет пренебрежимо малой по сравнению с эмиссией при $T \geq 1500$ К.

Температура источника резко уменьшается от центра к его периферии. Упрощение дальнейших расчетов состоит в подразделении всей области источника на очень малую область с температурой до 3000К и остальную большую часть области со значительно более низкой температурой. Частицы, образующиеся из меньшей области, имеют температуру эмиссии до 2000К; для частиц, образовавшихся из остальной области, эмиссией пренебрегаем. От общего количества образовавшихся частиц доля их с эмиссией будет равна γ , а доля без эмиссии соответственно равна $1 - \gamma$. Если количество образовавшихся частиц пропорционально части площади источника, то $\gamma \ll 1$. Для упомянутого выше пиропатрона в 40 г при плотности пиротехнического состава – 2 г/см^3 и среднем радиусе сферических частиц – 5×10^{-5} см полное сгорание такого пиропатрона даст $N_p = 3,8 \times 10^{13}$ частиц.

Выражение для концентрации частиц n_p получается при равномерном их выходе с площади L^2 из (5.9) и (5.10) простой заменой параметра теплового источника $Q/c_p \rho$ на N_p .

$$n_p(x = y = z = 0; t) = \frac{\alpha N_p}{2t_Q v L^2} \left[\Phi \left(\frac{L}{2\sqrt{4kT}} \right) \right]^2, \quad (5.23)$$

$$n_p \left(x = y = \frac{L}{2}, z = 0; t \right) = \frac{\alpha N_p}{8t_Q v L^2} \left[\Phi \left(\frac{L}{2\sqrt{4kT}} \right) \right]^2. \quad (5.24)$$

Горячие частицы в результате эмиссии электронов приобретают положительный заряд. Отрицательные легкие ионы, попадая на частицы, его нейтрализуют. Очевидно, что на траектории движения источника в начальный период образования частиц эмиссии и ионов будут их максимальные концентрации с наибольшей температурой. Исследуем процесс взаимодействия отрицательных легких ионов с частицами в этой области, поскольку именно в этой области указанный процесс наиболее показателен.

Нейтрализация заряженных частиц ионами предполагает столкновения ионов с частицами. Очень важно знать, все ли столкнувшиеся легкие ионы останутся на поверхности частицы или же часть их отразится от поверхности. Обычно без какого-либо объяснения неявно считается, что всякое столкновение как твердых частиц между собой [200], так и легкого иона с аэрозольной частицей [174] приводит к их объединению.

Только в работах более чем 50-летней давности приводится приблизительное обоснование факта физической адсорбции – удержание поверхностью твердого тела столкнувшихся с этой поверхностью газовых молекул. В [71] считается, что поверхность твердого тела обладает электрическим полем, которое связывает газовые молекулы, обладающие дипольным моментом. По [22], молекула газа, адсорбированная твердым телом, насыщает некоторую часть неуравновешенных сил на поверхности

и тем самым понижает поверхностное натяжение. Понижается свободная энергия системы, что приводит к ее устойчивости.

В настоящее время в тематике столкновений ионов с поверхностью твердых частиц отсутствуют экспериментальные исследования взаимодействия ионов с их параметрами в естественной атмосферной среде с поверхностью твердого тела. Остается присоединиться к господствующему мнению и считать, что все легкие ионы при столкновении с частицами захватываются ими.

Средняя длина свободного пробега легкого иона λ_i в воздушной среде даже при самой высокой рассматриваемой температуре 2000К не более $2,21 \times 10^{-6}$ см. Число Кнудсена – отношение $\lambda_i/r \sim 0,04$, значительно меньше единицы. Значит, реализуется диффузионный режим попадания ионов на частицы радиуса 5×10^{-5} см.

Попадание ионов на частицы обусловлено также электрическим взаимодействием положительно заряженных частиц с отрицательными ионами, которое выражается через подвижность ионов – b . Подвижность ионов связана с их коэффициентом молекулярной диффузии D .

$$b = \frac{eD}{kT}, \quad (5.25)$$

где e – численное значение заряда электрона. Соотношение (5.25) справедливо только при условии, когда средняя энергия, приобретенная ионами в электрическом поле частицы, значительно меньше тепловой энергии иона

$$\frac{m_{ион}}{2} \overline{v_T}^{-2} \gg b^2 \left(\frac{N_3 e}{r^2} \right)^2 \frac{m_{ион}}{2}. \quad (5.26)$$

Или

$$b^2 \ll \frac{\overline{v_T}^{-2}}{\left(\frac{N_3 e}{r^2} \right)^2},$$

что при $r = 5 \times 10^{-5}$ см выполняется для всех температур, при которых имеет место термоэлектронная эмиссия, табл.5.4.

По формулам (5,9), (5,23) и (5,25) рассчитаем t_{np} – предельное время существования температуры T и концентрации частиц n_p ; молекулярного коэффициента легких ионов D и их подвижность b . Расчеты t_{np} проведены при коэффициенте турбулентной диффузии $K(l) = 0,2 l^{4/3}$ см/с² с $V = 50$ м/с. При $K(l) = 0,086 l^{4/3}$ см/с² t_{np} увеличивается в 1,44 раза; если $V = 10$ м/с, то t_{np} увеличивается в 2,51 раза. Средние значения величин в пределах температуры эмиссии электронов 2000-1500К $n_p = 4,61 \times 10^7$ см⁻³, $D = 2,213 \times 10^{-2}$ см²/с, $b = 43,55$ СГСЕ. Все это приводится в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Результаты расчета величин в зависимости от температуры:

t_{np} – предельное время существования температуры T и концентрации частиц n_p ; D - молекулярный коэффициент диффузии, b - подвижность легких ионов.

Расчеты t_{np} проведены при $K(l) = 0,2 l^{4/3}$ см/с², $V = 50$ м/с

T, K	t_{np}, c	n_p, cm^{-3}	$D, cm^2/c$	$b, CГСЕ$
2273	$6,674 \times 10^{-3}$	$5,967 \times 10^7$		
2000	$7,958 \times 10^{-3}$	$5,140 \times 10^7$	$2,684 \times 10^{-2}$	46,68
1500	$9,635 \times 10^{-3}$	$4,080 \times 10^7$	$1,743 \times 10^{-2}$	40,42
1000	0,01241	$2,711 \times 10^7$	$0,9590 \times 10^{-2}$	33,36
750	0,01495	$1,897 \times 10^7$	$6,163 \times 10^{-3}$	28,58
500	0,02082	$9,677 \times 10^6$	$3,354 \times 10^{-3}$	23,33
400	0,02446	$6,058 \times 10^6$	$2,400 \times 10^{-3}$	20,87
300	0,05033	$1,330 \times 10^6$	$1,559 \times 10^{-3}$	18,07
273	0,20	$4,972 \times 10^4$	$1,353 \times 10^{-3}$	17,24

Рассмотрим заряджение частиц в процессе термоэлектронной эмиссии образовавшимися легкими ионами. Столкновение ионов с частицами

обусловлено как направленным движением ионов к поверхности частицы, так и диффузионным потоком ионов.

Выражение для направленного потока J_n легких ионов на заряженные частицы без эмиссии радиуса r имеет вид:

$$J_n = 4\pi r^2 \frac{q}{r^2} b n_p v (1 - \gamma) \tau, \quad (5.27)$$

где q – заряд частицы, n_p – их концентрация, v – концентрация легких ионов, τ – продолжительность времени потока.

Диффузионный поток J_d на частицы без эмиссии выражается как

$$J_d = 4\pi D r n_p (1 - \gamma) v \tau. \quad (5.28)$$

Для частиц с эмиссией $(1 - \gamma)$ нужно заменить на γ . Ионы, столкнувшиеся с частицами, останутся на их поверхности даже при температуре частиц $\sim 2000\text{K}$. Ионы попадают как на горячие частицы с эмиссией, так и на незаряженные относительно холодные частицы без эмиссии. При этом, очень важно принять во внимание, что отрицательные ионы, попавшие на поверхность эмитирующих частиц, уменьшают положительный заряд этих частиц. А значит, уменьшают электрическое поле, которое ограничивает выход электронов по формуле (5.17). Уменьшение величины этого поля увеличит количество эмитирующих частиц, которые, как следует из подраздела 5.4, сразу образуют отрицательные легкие ионы молекулы O_2^- .

Таким образом, можно считать, что, несмотря на превалирующее попадание отрицательных ионов на сильно заряженные частицы, их положительный заряд фактически не изменяется. Остается без изменения и общая концентрация отрицательных ионов. Следовательно, в процессе эмиссии эффект заряжения частиц сводится лишь к попаданию ионов на частицы без эмиссии и приобретение ими отрицательного заряда.

Определим этот заряд, воспользовавшись (5.27) и (5.28). Расчеты потоков предполагают выбор величины времени τ . Очевидно, что по

смыслу задачи τ должно быть выбрано таким, чтобы количество формально рассчитанных захваченных ионов не превысило их реального количества.

Оценки показывают, что τ может быть выбрано как $\frac{1}{4}$ от общего времени эмиссии $1,759 \times 10^{-2}$ с, т.е. $4,398 \times 10^{-3}$ с (табл.5.4). Хотя ясно, что чем меньше шаг по времени, тем точнее результаты расчетов. Другими словами, расчет захваченных ионов в период эмиссии подразделяется на 4 временных интервала.

Расчеты проведены по стандартному методу расщепления на физические процессы: эмиссия электронов и образование легких ионов определенной концентрации, а затем захват этих ионов частицами. При этом предполагалось, что эмиссия электронов и формирование частиц происходит равномерно во времени. Из табл. 5.3 следует, что при не очень больших величинах термоэлектронной работы выхода выброс электронов за все время эмиссии составляет $2000e^-$ (e здесь и далее означает количественное значение заряда электрона, e^- - отрицательный заряд, e^+ - положительный заряд).

Проиллюстрируем расчеты на первых двух временных шагах, используя табл.5.4 со средними значениями за время эмиссии: n_p , D и b .

Первый временной шаг:

концентрация ионов - $\frac{2000}{4} \frac{4,61 \cdot 10^7}{4} 0,03 = 1,728 \cdot 10^8$ ион/см³; заряд на

частицу без эмиссии диффузионным потоком (5.28) – $11 e^-$.

Второй временной шаг:

1. концентрация ионов;
2. отталкивание ионов при отрицательном заряде $11 e^-$ (5.27);
3. диффузионное попадание на частицу – $12 e^-$;
4. остаток ионов от второго интервала.

После четвертого интервала осталось ионов – $1,551 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$, которые должно распределиться на частицы с зарядом $2000e^+$ и частицы без эмиссии.

Дробное количество электронов нужно понимать, конечно, в статистическом смысле.

После прекращения эмиссии система со средним числом частиц $4,61 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$ и количеством легких ионов $\approx 1,551 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ проходит в течение 0,3230 с все стадии охлаждения от температуры 1000 до 273К. При этом нужно учесть диффузионное размывание системы с каким-то коэффициентом турбулентной диффузии. Этот коэффициент не может быть взят в форме (5.11). Формула (5.11) включает скорость движения источника введения реагента и связана с линейными размерами диффузионного пространства l через $t_{np}V$. При охлаждении системы в некоторой точке на траектории движения источника после прохождения источником этой точки скорость источника не может играть какую-либо роль в диффузионном процессе.

Остается как-то косвенно учесть диффузию охлаждающейся системы. Поступим следующим образом. Вместо последовательного поэтапного расчета охлаждения системы для всего интервала температур проведем расчеты для некой системы со средними значениями параметров \bar{n}_p , \bar{b} и \bar{D} . Эти средние значения получаются с учетом весовых множителей для отдельных величин t_{np} при соответствующем значении температуры, табл.5.4.

$$\bar{n}_p = \sum_i (n_p)_i(t_n)_i; \quad \bar{b} = \sum_i b_i(t_n)_i; \quad \bar{D} = \sum_i D_i(t_n)_i, \quad (5.29)$$

где суммирование по i осуществляется по 6 градациям температур от 1000 до 273К.

В результате такого суммирования получаем:

$$\bar{n}_p = 1,0465 \times 10^6 \text{ см}^{-3}; \quad \bar{b} = 6,195 \text{ ед.СГСЕ}; \quad \bar{D} = 0,6452 \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}. \quad (5.30)$$

Заметим, что в формулы (5.27) и (5.28) для направленного и диффузионного потоков легких ионов на частицы входят именно произведения: $n_p\tau$, $b\tau$ и $D\tau$.

Уменьшение концентрации легких ионов после эмиссии будем считать пропорциональным уменьшению количества частиц при охлаждении от температуры эмиссии до 273К. А именно, количество легких ионов с концентрацией $1,551 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ при охлаждении уменьшается в $4,61 \times 10^7 / 1,0465 \times 10^6 = 44,05$ раз. Таким образом, в системе с параметрами (5.30) концентрация легких ионов будет $1,551 \times 10^8 / 44,05 = 3,521 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$.

Это количество легких ионов перераспределяется между частицами $0,03 \times 1,0465 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ с зарядом $2000e^+$ после эмиссии и частицами без эмиссии в количестве $0,97 \times 1,0465 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ с зарядом $63e^-$. Отношение легких ионов, попавших на частицы с зарядами $2000e^+$ и $63e^-$, будет равно отношению направленного потока ионов на частицы с $2000e^+$ к диффузионному потоку ионов на частицы с $63e^-$. Диффузионным потоком на частицы с $2000e^+$ и отрицательно направленным потоком на частицы с $63e^-$ ввиду их относительной малости пренебрегаем.

Рассчитанное по формулам (5.27) и (5.28) с учетом (24) указанное соотношение потоков будет равно:

$$\frac{J_n}{J_\partial} = 5,702. \quad (5.31)$$

Отсюда на частицы с $2000e^+$ попадут ~ 96 ионов, уменьшая их заряд до $\sim 1900e^+$. На частицы с $63e^-$ попадет меньше одного иона, сохраняя их отрицательный заряд $63e^-$.

Рассмотрение действия заряженных частиц (K_2CO_3) было приведено в Главе 3 на примере $NaCl$ как наиболее распространенного гигроскопического реагента.

5.6. Распространение в конвективном облаке частиц реагента

На примере конвективного облака мощности 4 км в [84,85,86] рассмотрено пространственно-временное изменение концентрации частиц реагента. Реагент вводился в подоблачный слой в количестве 4×10^{15} частиц, т.е. того же количества частиц, которое формируется из 40 г сгорания пиротехнического состава. Если пренебречь каким-либо взаимодействием частиц с облачной средой, то уже в течение первых 10 мин после введения концентрация частиц 10 л^{-1} охватывает большую часть объема облака вплоть до его верхней границы [85,86]. Столкновения частиц реагента радиуса 10^{-5} см с облачными каплями в процессе его распространения в облаке обусловлено только броуновской и турбулентной диффузией. Расчеты показывают, что такие столкновения уменьшают концентрацию реагента на ничтожно малую величину [148]. Захват облачными каплями гигроскопических заряженных частиц приводил бы к росту капель, а значит, способствовал бы осадкообразованию.

На основании оценок роста капель на гигроскопических ядрах разных радиусов можно утверждать, что на частице радиуса 10^{-5} см даже при очень высокой степени гигроскопичности ядра могут образоваться капли, во всяком случае радиусом, не превышающем 15 мкм [269]. Рост капель до 20 мкм до начала гравитационной коагуляции и образования капель осадков возможен только при их электрических взаимодействиях, приводящих к коагуляции капель [147, 157, 159, 174].

В настоящее время отсутствуют сколько-нибудь строгие сведения о коэффициенте захвата заряженных капель в зависимости от их зарядов и радиусов, имеются лишь отдельные опытные факты о действии зарядов капель на их коагуляцию [147,148]. Отмечается эффект действия зарядов для радиусов капель даже малых размеров - 3-4 мкм и при одноименных зарядах [148]. Поэтому проведем сопоставление заряда облачных капель в

естественных условиях, которые не приводят к осадкам, и возможных зарядов капель, обусловленных заряженным реагентом.

Средний заряд облачной капли q (в единицах заряда электрона e) не превышает $20r$, где r выражается в мкм [173]. Таким образом, заряд даже при $r = 10$ мкм не превысит 200 e . В то время как частицы заряженного реагента в течение $6с$ могут приобрести значительно больший заряд. После охлаждения через 140 с капля меньшего размера, возникшая на этой гигроскопической частице, может сохранить этот заряд.

Остается выявить роль отрицательных ионов. Они образуются непосредственно из 40 г реагента в среднем количестве 4×10^{16} ионов и, кроме того, в результате захвата электронов эмиссии молекулами атмосферного воздуха. О точном количестве захваченных электронов эмиссии не представляется пока возможным сделать какое-либо определенное суждение. В предельном случае, как следует из экспериментальных данных [169] число частиц при термоэлектронной эмиссии может превосходить 4×10^{16} ионов. При высоких температурах это должны быть чисто молекулярные ионы.

Влияние ионов на облачные капли начинается после охлаждения теплового источника через 140 с с концентрацией ионов в объеме 131 м^3 воздушной среды, равной 3×10^8 ион/см³. Рекомбинация этих отрицательных ионов с положительно заряженными частицами радиуса 10^{-5} см очень малой подвижности, да еще и окруженными электронами эмиссии, должна быть очень незначительной, чтобы заметно уменьшить концентрацию отрицательных ионов. В результате в облачной среде окажутся дополнительные концентрации отрицательных ионов, что приведет к зарядению облачных капель отрицательным зарядом. Особенно большие концентрации отрицательных ионов будут вблизи области охлаждения, пока интенсивная турбулентность и направленные потоки воздуха в облаке не уменьшат их начальную концентрацию.

5.7. Основы технология воздействия на конвективные облака пиротехническими генераторами

Механизм искусственной ионизации облачной среды, изложенный в предыдущих пунктах, приводящий к её модификации, был представлен в теоретической форме. Дальнейшее обоснование направленных активных воздействий на облака заряженным гигроскопическим реагентом предполагает более глубокое понимание взаимодействия созданных реагентом искусственных ионов с парообразной и жидкой фазами воды. Такое взаимодействие сводится преимущественно к прямому электрическому взаимодействию заряженной частицы (иона) с молекулой воды как системой мультиполей. Силы Ван-дер-Ваальса, по-видимому, не будут играть заметной роли в таком взаимодействии.

Данное объяснение затрагивает только влияние непосредственно "ионогенной" части реагента на облачную среду, исключая её последствия – влияние гигроскопичности на укрупнение капель и электрическую коагуляцию. Это самая сложная часть в общем обосновании взаимодействия реагента с облаком. Именно в этой части исследования должен быть получен ответ на вопрос, какие химические элементы в металлическом горючем пиротехнических реагентов будут наиболее эффективны применительно к воздействию на облачную среду. Здесь не рассматривается гигроскопическая часть действия реагента, что не означает умаления её роли в общем эффекте действия реагента. Просто конденсационный рост на растворимом гигроскопическом ядре изучен значительно полнее всего остального, относящегося к ионогенной составляющей гигроскопического реагента.

Последовательность мероприятий, выполняемых в процессе подготовки и проведения оперативных работ по воздействиям на конвективные облака состоит из следующих этапов.

Первое – это прогноз условий составляется оперативно-производственной организацией Росгидромета (ОПО) и состоит из прогноза синоптического положения (перемещения и эволюция

барических образований, фронтов, облачных систем) и прогноза развития облаков, пригодных для воздействий. Прогноз составляется на 12 ч с делением на 3-часовые интервалы. Наличие в прогнозе информации о пригодности облаков для воздействия служит основанием для организации работ по ИВО. Количество и сроки вылетов определяются ожидаемой продолжительностью пребывания над районом работ облаков, из которых могут выпадать осадки.

Второе - решение о начале проведения работ принимается руководителем воздействий на основании прогноза погоды, анализа текущей синоптической информации и сведений о фактической погоде в районе лесного пожара и его состоянии. При этом в первую очередь учитывается информация о наличии в районе работ пригодных для воздействия облаков по данным метеостанций и постов, метеорологического радиолокатора, МИСЗ, экипажей ВС и др. источников информации. Основные различия в технологических циклах проведения воздействий на облака различных форм заключаются в способах [105, 107, 118, 137, 138] и схемах засева облаков с борта самолета [9, 17, 116, 151]. Так, после установления соответствия параметров конвективных облаков критериям их пригодности к засеву и принятия решения о проведении работ по засеву экипажу самолета дается команда о выходе на рубежи засева и о подготовке к засеву.

Третье – это засев отдельных изолированных мощных конвективных облаков. Схема засева изложена в [64, 77] самолет либо пересекает их вершину, либо пролетает на высоте ниже 200 м под ее верхней границей. В момент пересечения самолетом верхней границы облака с борта самолета производится отстрел пиропатронов. Таким образом, осуществляется последовательный засев всех облаков, которые по своим характеристикам удовлетворяют критериям пригодности для засева с целью изменения режима осадков [199].

При засеве многовершинных облаков в первую очередь производится засев тех облаков, которые находятся в стадии роста и у которых значения температуры на уровне верхней границы находятся ниже 0°C. Критерии пригодности облачных кластеров (скоплений) для засева в целом аналогичны подобным критериям для изолированных облаков. Ввод реагента в облака может осуществляться с верхней, нижней или боковой границы облака.

Следует заметить, что приведенная схема работ соответствует условиям оборудованного полигона. При ИВО с целью снижения КПО или тушения лесных пожаров такие условия могут быть созданы лишь при наличии системы управления пожаротушением, которая рассмотрена в главе 6. При отсутствии МРЛ и системы управления летчику-наблюдателю необходимо оценить скорость и направление перемещения конвективного облака. На направление и скорость перемещения облака наряду с ветром влияют вертикальный перенос количества движения конвективными потоками, эволюция облака, образование и распад вновь образующихся ячеек. Облако возникает как одна ячейка, но на расстоянии в 20-30 км от него появляются дочерние ячейки, имеющие вид быстро растущих мощных кучевых облаков. Новые ячейки образуются, как правило, с правого бока от «материнского облака» и тем самым создают впечатление поворота облака [251]. Угол поворота находится в пределах 10-60 градусов. Схема засева *Cu cong* представлена на рис. 5.2.

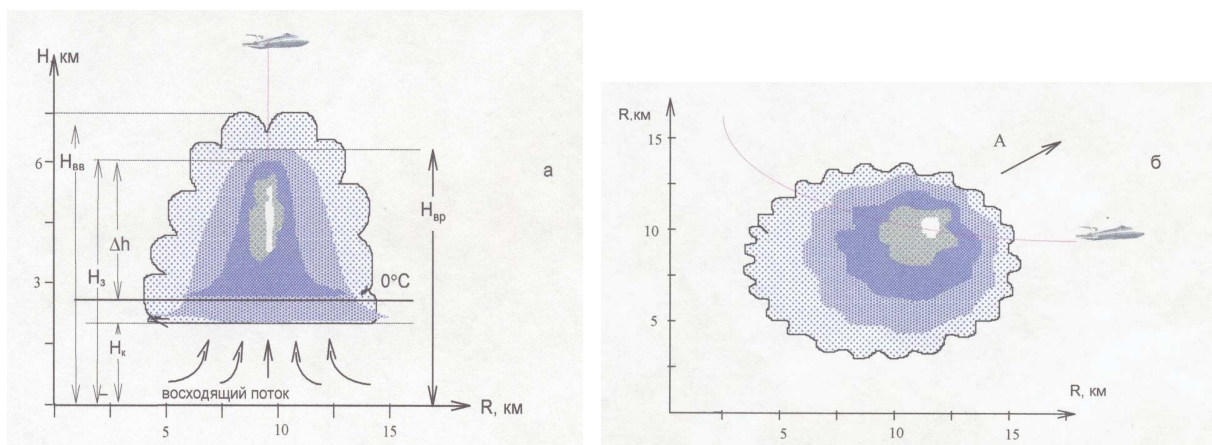


Рисунок 5.2. Схема засева одноячейкового мощно-кучевого облака (Cu Cong)

Описание рис. 5.2:

а – вертикальный разрез облака, б – горизонтальный разрез облака [64].



-видимая периферийная часть облака;



-внешний контур радиолокационной отражаемости $\lg Z_d \approx$

0,6

($\eta = 10^{-11} \text{ см}^{-1}$);



-зона формирования осадков, ограниченная изоконтуром \lg

$Z_d \approx 1,6$ ($\eta = 10^{-10} \text{ см}^{-1}$);



-активная часть ЗФО, ограниченная изоконтуром $\lg Z_d \approx 2,6$

($\eta = 10^{-9} \text{ см}^{-1}$);

$H_{\text{вв}}$ – высота облачности видимая;

$H_{\text{вр}}$ – высота облачности радиолокационная;

H_3 – высота от земли до верхней части ЗФО;

$H_{\text{к}}$ – уровень конденсации;

Δh – высота от нулевой изотермы до верхней части ЗФО;

----- - маршрут СМЛ;

A – направление движения облачности

Ввод реагента в облако может осуществляться с верхней, нижней и боковой границ в направлении очага пожара. Расход пиропатронов на засев каждой вершины примерно соответствует их расходу на засев

изолированных одноячейковых облаков [17,64,116]. Засев кучево-дождевой облачности производится исключительно с верхней границы облаков. Схема засева кучево-дождевой облачности, расположенной среди слоисто-дождевой системы облаков также осуществляется с верхней границы.

5.8. Искусственное вызывание осадков на лесной пожар

Выполнение полетов для АВ на облака с целью ИВО для снижения класса пожароопасности лесов и тушения лесных пожаров производились с самолетов Ан-2п, Ан-26п, Бе-12п[116] с соблюдением правил полетов [77,236]. В настоящее время имеются более современные воздушные суда Ан-32п, Ил-76п и Бе-200п [258], выполненные в противопожарном варианте.

Патрульные полеты, проводящиеся в соответствии с классами пожарной опасности по условиям погоды по шкале В.Г.Нестерова[177] или по местным шкалам, утверждаемым федеральным органом управления лесным хозяйством по представлению ЦБ «Авиалесоохрана», целесообразно совмещать с ИВО при наличии благоприятных погодных условий.

При V классе пожарной опасности в лесу по условиям погоды ежедневно производится трёхкратный осмотр территории, при IV классе ежедневно проводится не менее двух облетов каждого маршрута. При III классе проводится 1-2 облета маршрута в течение дня. При II классе патрулирование проводится через 1-2 дня. При наличии фактической горимости лесов полеты при II классе пожарной опасности до момента прекращения действия пожаров проводятся ежедневно. При I классе патрулирование, как правило, не проводится. При благоприятном развитии погодных процессов для выпадения осадков полёты могут выполняться при любом КПО с целью ИВО для снижения пожарной опасности в лесу [64, 77, 116, 121].

Планирование и организация производственных работ включают: предварительную подготовку, планирование полетов в пожароопасный сезон, предполетную подготовку, принятие решения на вылет, расчет времени вылета для вывода самолета в заданный район.

На этапе предварительной подготовки (вне пожароопасного сезона) решаются следующие задачи [77]:

а) всестороннее исследование природно-климатических условий района АВ и их связей с хозяйственной деятельностью;

б) подготовка и согласование программы работ;

в) специальное теоретическое и практическое обучение персонала для проведения -производственных работ;

г) решение организационных вопросов, связанных с обслуживанием воздушных судов, согласованием условий специальных полетов по воздействиям в районе проведения работ, использованием средств связи;

д) подготовка технических средств воздействия и специальной аппаратуры;

е) решение вопросов взаимодействия с межрегиональными территориальными управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и другими заинтересованными организациями;

ж) организация системы контроля за результатами воздействия .

Непосредственно перед началом работ проводятся следующие мероприятия:

- оборудование самолетов пожарной авиации техническими средствами воздействий;

- подготовка, метрологический контроль и установка используемых измерительных средств;

- уточнение общей схемы управления и вариантов проведения опытных работ;

- организация наземного метеорологического обеспечения работ, сбор, обработка и анализ метеорологической информации, поступающей из ГМЦ РФ, УГМС, и др. ведомств;

- согласование порядка взаимодействия с наземными службами пожаротушения работ по ИВО и обеспечению контроля за результатами АВ;

- изучение инструкций по технике безопасности;

- оформление документов (лицензий, инструкций, информационных карт, разрешений и др. док.) на выполнение летных работ.

Оперативное планирование полётов по АВ с целью снижения КПО или тушения лесных пожаров производится исключительно по прогностическим показателям о развитии ресурсной облачности в зоне действующих пожаров.

Профилактические воздействия в целях снижения пожарной опасности в лесу могут производиться по прогнозу конвективной облачности и дополнительной информации о горимости, а также по сообщениям с пунктов приема спутниковой информации и воздушных судов, выполняющих патрульные или другие работы по охране лесов.

Планирование полётов производится при условии постоянного метеорологического обеспечения, которое позволяет своевременно предвидеть необходимость и природную обеспеченность выполнения операций по ИВО. Оперативно полеты планируются, как правило, на следующие сутки. Заявка на полет подаётся до 10 ч текущих суток с указанием времени вылета, района и режима работ (эшелонирования) по предварительному прогнозу погоды.

Время подготовки самолетов и экипажей, количество и время вылетов определяются ожидаемой продолжительностью пребывания над районом работ конвективной облачности, пригодной для ИВО. При этом учитываются санитарные нормы налета часов и продолжительность

рабочего дня экипажей, место проведения работ и летно-технические данные воздушных судов.

С учетом затрат времени на перелет к району работ и возвращение на базу, а также метеорологических условий и необходимого резерва авиатоплива, продолжительность полета в среднем не может превышать дневной санитарной нормы экипажа.. Поэтому, если продолжительность сохранения условий благоприятных для проведения АВ, превышает указанную величину, вылет необходимо планировать так, чтобы вовремя произошла смена самолетов в зоне работ, была произведена дозаправка на ближайшем к району работ аэродроме.

Предполетная подготовка включает:

- анализ горимости лесов, метеорологической обстановки и их прогноз;
- сбор метеоинформации, необходимой на борту воздушного судна для определения условий полета;
- оформление задания на полет (метеобюллетень и др. документы);
- уточнение тактики работ для конкретных пожаров и метеоусловий, инструктаж экипажа воздушного судна;
- снаряжение и проверка технических средств воздействия;
- согласование задания на полет с производственно-диспетчерской службой (ПДС) гражданской авиации.

Примечание - При больших расстояниях от пункта радиозондирования до района работ в необходимых случаях организуется температурное зондирование с патрульных самолетов. Должно быть также предусмотрено обновление информации запросом непосредственно с борта.

Решение на вылет принимается, если в районе работ имеется необходимость в ИВО для снижения КПО, при возникшем пожаре и ожидается развитие конвективной облачности, пригодной для воздействия с целью ИВО.

Решение на вылет принимается руководителем авиационного отделения (авиазвена) по согласованию с пунктом диспетчерского управления. Решение принимается не позднее, чем за 1 ч до времени вылета, указанного в заявке на полет. Время вылета может быть перенесено на другой срок, если погодные условия для работы по имеющейся информации возникнут позднее спрогнозированного срока.

Перед вылетом ВС для проведения АВ ПДУ(летчик-наблюдатель) дополнительно уточняет следующие данные(при наличии) по намечаемому району работ для определения необходимого количества искусственных осадков, оказывающих пожарогасящий эффект (см. п 6.9):

- наличие действующих крупных лесных пожаров, их количество;
- характер пожаров (низовые, верховые, почвенные);
- интенсивность пожаров (слабые, средние, сильные) - скорость распространения пожара (низовой от 1м/мин до 3м/мин и более; верховой от 3м/мин до 100м/мин);
- высота пожара (слабый низовой до 0,5м; средний до 1,5м; сильный выше 1,5м);
- глубина прогарания почвенного пожара (слабый-до25см. средний-от 25 до50см, сильный более50см).
- состояние погоды в последний срок наблюдения (температура воздуха, относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра, наличие облачности, характер и количество осадков и др. метеовеличины, а также характеристики таких явлений погоды, как грозовая активность, шквалы и др.

Расчет времени вылета и вывод самолета в заданный район проводятся при благоприятном прогнозе развития конвективной облачности с таким расчетом, чтобы самолет прибыл в район работ к периоду ожидаемого достижения облаками необходимых параметров (мощность облачности 2км и более, наблюдается рост облачности, осадки

не выпадают, грозы отсутствуют и др. условия). Наиболее благоприятные часы для ИВО 14-17ч по местному времени

Экипаж выводит самолет в заданный район по правилам визуального полета на высоте для легкомоторных воздушных судов ниже высоты нижней границы облаков на 100-200 м., для средне высотных ВС на высоте 200-300м. над верхней границей облаков. Ведется тщательная прокладка маршрута и привязка выбранных облаков к местности с очагами пожаров по патрульной или полётной карте с масштабом 1-5 км в 1 см.

Полеты по АВ на облака выполняются в соответствии с [236] и другими документами, регламентирующими летные работы.

Выбор и уточнение рубежа засева облаков проводится летчиком-наблюдателем после прилета в заданный район с учетом метеорологической информации и состояния пожара. План полета самолета в районе, где наблюдается лесной пожар, строится с учетом следующих условий и требований:

- в большинстве случаев отдельные конвективные облака являются элементами облачных полей или гряд;

- облака движутся под влиянием ведущего потока в атмосфере. Опираясь на экспериментально установленные закономерности, в качестве первого приближения при оценке направления и скорости конвективных облаков на стадии мощных кучевых, можно взять значения ветра на высоте 700 мб поверхности (около 3 км);

- для достижения практически значимого эффекта, выраженного слоем дополнительных осадков на площади пожара, активные воздействия целесообразно выполнять по схеме многократного пролета на некотором рубеже с наветренной стороны от пожара;

- барражирование на расчетном рубеже с наветренной стороны от очага пожара сопровождается засевом облаков, удовлетворяющих критериям их пригодности для АВ.

-при выборе рубежа, определении его азимута и удаления от очага пожара, длины и схемы полетов в зоне рубежа должны быть учтены как характеристики конкретной реализации атмосферных условий, так и тактико-технические характеристики конкретного комплекса технических средств воздействия и их эффективности.

Расчет рубежа воздействия (расстояние до пожара) производят с учетом направления и скорости переноса облаков, определяемой фактически по наблюдениям с ВС или иным способом, характером и скоростью перемещения передней кромки очага пожара, времени срабатывания реагента (от воздействия до начала выпадения осадков).

Чтобы вызванные из облаков искусственным путем осадки попали на очаг пожара, определяют расстояние S , км, от точки воздействия до зоны горения с учетом скорости перемещения очага пожара ($V_{п}$) и облаков ($V_{о}$) км/ч, времени от момента воздействия до начала выпадения осадков t_1 , (ч), и времени от начала выпадения осадков до максимального их развития t_2 , (ч), по формуле:

$$S = V * (t_1 + t_2), \text{ где } V = V_{п} + V_{о}; \quad (5.33)$$

Скорость и направление движения облаков определяют одним из способов:

по скорости ветра на высоте 3 км, где осуществляется перенос основной массы облаков или по движению теней на земле.

Время (t_1) от момента воздействия до начала выпадения осадков устанавливают опытным путем (ориентировочно от 15 до 20 мин).

Время (t_2) от начала выпадения до максимального их развития зависит от мощности и водности конвективного облака (ориентировочно от 2 до 10 мин). Для большей вероятности попадания осадков на очаг пожара воздействие производят не на одно конвективное облако, а на несколько, охватывая очаг пожара подковой, чтобы осадки выпадали не только

непосредственно на действующий пожар, но и на прилегающие к нему территории, что предотвращает распространение очага пожара.

Рекомендуемое упреждение при расчете рубежа воздействия составляет интервал времени от 25 до 35 мин.

Оптимальная длина линии воздействия (h) определяется на основе анализа переноса в атмосфере ансамбля конвективных облаков.

Исходные гипотезы, принятые для анализа:

- движение всех облаков ансамбля происходит с одинаковой скоростью и по совпадающим направлениям;
- каждое облако движется как единое целое с некоторой средней скоростью ветра;
- направление движения облаков после воздействия может измениться, но его возможно установить априори или по данным измерений единичных облаков.

Определение оптимальной длины линии воздействия для любых исходных данных о скорости переноса облаков и самолета ведется по номограмме или на ПК, если длина рубежа воздействия L не лимитируется размерами очага пожара.

Так, например, при заданных значениях L , скорости самолета V_c и облаков V_o определяется, какая часть облаков, намеченных для воздействия и пересекающих линию L , может быть засеяна с целью ИВО.

В таблице 5.4 приведена вероятность пропуска облаков при полете на различной L для $V_o = 10$ м/с и $V_c = 180$ км/ч.

Таблица 5.4 - Зависимость относительного числа пропускаемых облаков от L

Длина рубежа воздействия L , км	33	75	130
Вероятность пропуска облаков	0,0	0,5	0,7

Минимальный пропуск «ресурсных» облаков обеспечивается при длине L в пределах 25-40 км. При большей длине L с наветренной стороны очага пожара потребуется привлечение дополнительных самолетов.

Для системы самолет Ан-2 – САГ-ФХС размеры области искусственно вызванных осадков из мощных кучевых облаков в среднем составляют 400-500 км².

Для засева с легкомоторных воздушных судов выбирается эшелон полета ниже основания облака на 50-100 м. Заход для засева осуществляется в горизонтальном полете от одного края облака к другому по средней линии проекции его длины.

По скорости полета и фиксированному времени по секундомеру уточняются горизонтальные размеры облака.

При относительно небольших горизонтальных размерах облака используются включенные генераторы со временем действия 60с, чтобы не было излишних затрат реагента или один ПВ-26 ФХС в восходящий поток под облаками.

При расположении облаков в виде гряд засев проводится вдоль гряды с таким расчетом, чтобы максимальное количество реагента попало в очаги восходящих потоков.

Оптимальными сечениями облаков, на которых выполняется засев, считаются:

- для медленно смещающихся внутримассовых облаков – сечение, близкое к центральному;
- для гряд конвективных облаков, связанных со слабо выраженными фронтальными разделами, и быстро движущихся внутримассовых – сечение, смещенное к передней части оснований облаков.

5.9. Уточнение рубежа воздействия

Расчет удаления рубежа воздействия ведется с таким расчетом, чтобы максимальное количество осадков выпало в пределах пожара. При этом учитывается эмпирически установленный интервал времени после засева до появления осадков под облаком, а также поправка на высоту полета.

В среднем осадки у земли наблюдаются через 20 мин. Переход к умеренным и сильным осадкам происходит через 5-10 мин после начала их выпадения. С учетом экспериментальных данных, скорости переноса облаков и необходимого времени для достижения осадками земли, рубеж воздействия выбирается на удалении 30-минутного переноса облаков от очага пожара.

По контрольному воздействию с отслеживанием места выпадения осадков по радиолокатору, с самолета или по сообщениям с земли рекомендуется выполнять корректировку рубежа воздействия. Гряды облаков не всегда ориентированы перпендикулярно направлению ветра в облачном слое. При засеве таких гряд рубеж воздействия ориентируется вдоль них, а траектория полета может отклоняться от прямолинейной с целью засева фронтальных частей конвективных ячеек. Учитывая, что высока вероятность отклонения направления зон осадков из облаков грядовой структуры от ветра, определенного под облаками или на среднем уровне в облаках, рекомендуется засев проводить в виде полуокружности от очага пожара.

При проведении АВ необходимо постоянно следить за изменениями окружающей обстановки и поступающей метеорологической информацией. Это важно для правильной оценки изменяющихся атмосферных условий и связанной с этим необходимости корректировки схемы АВ.

Изменение направления или скорости ветра, а соответственно и переноса облаков, обусловит изменение рубежа воздействий. При изменении геометрических размеров облаков должно быть соответственно увеличено или уменьшено количество вводимого реагента, либо изменена схема полета при засеве, а в некоторых случаях вообще прекращен засев, если верхняя граница облака не достигает уровня температуры срабатывания льдообразующего реагента.

При отрицательном эффекте АВ на данное облако или гряде облаков необходимо отлететь в сторону и провести дополнительное определение их параметров и в соответствии с обновленной метеорологической информацией вновь принять решение о засеве (или не засеве) облака.

При работе в зоне действия МРЛ и надежной устойчивой радиосвязи с ним следует возможно чаще запрашивать информацию об изменении обстановки для уточнения технологии воздействий[3,16].

Чрезвычайно важно использовать возможности наземного радиотехнического комплекса для обеспечения безопасности выполнения полетов при ухудшении условий погоды, в частности для обхода опасных для полетов зон ливневых осадков и гроз.

Полеты с целью АВ прекращаются в следующих случаях:

- отсутствие положительного эффекта АВ;
- возникновение опасных явлений погоды (гроза, шквалы, град, сильная болтанка и др.);
- сообщение о запрете полетов;
- выход параметров облачности за пределы диапазона пригодности облаков к АВ.

5.10. Наведение искусственно вызванных осадков на лесной пожар

Для практической работы по АВ на облака с целью ИВО можно определить вероятность выпадения осадков на район лесного пожара, зная скорость и направление ветра на высоте полета. После осмотра и определения вида пожара, его площади и состояния целесообразно развернуться от зоны пожара навстречу вектору ветра и пройти до облака на встречном курсе для определения расстояния, исходя из скорости и времени полета самолета.

Зная расстояние от облака до зоны пожара и скорость его переноса, рассчитывается время их совмещения. По графику или таблице

рассчитывают время набора рабочей высоты самолетом от высоты, на которой находится самолет при полете. Время от начала АВ на облако до выпадения максимальных осадков принимается за постоянную величину, равную 30 мин. Общее время набора рабочей высоты и интервал времени до максимального выпадения осадков сравнивают с ожидаемым временем переноса облака к району пожара. Если это время совпадает или различается в пределах 10-15 мин, можно приступить к работе по АВ на облака с целью ИВО для тушения лесного пожара.

Пример: Высота полета – 600 м. Расстояние между облаком и зоной пожара – 25 км. Скорость ведущего потока (ветра), а значит, и движения облака – 27 км/ч. Время переноса облака до зоны пожара – 0 ч 56 мин.

Время набора рабочей высоты от 600 до 5000 м – 0 ч 20 мин. Время до выпадения максимальных осадков – 0 ч 30 мин. Сопоставляем время перемещения облака с общим временем набора рабочей высоты и интервалом времени до выпадения максимальных осадков:

$$0 \text{ ч } 56 \text{ мин} - 0 \text{ ч } 50 \text{ мин} = 0 \text{ ч } 06 \text{ мин.}$$

Следовательно, на выбранное облако можно производить воздействие и осадки выпадут на район пожара. При повторном заходе для ИВО расчеты производятся по уточненным данным о перемещении облаков и интервала времени от момента засева облаков до выпадения искусственно вызванных осадков.

5.11. Использование заряженного аэрозоля для инициирования грозовых разрядов

Разработанный реагент [108,113,117] – может быть использован для предупредительного разряда электрических зарядов из мощных кучевых и кучево-дождевых облаков. При благоприятных условиях способы [118,138] можно использовать для защиты объектов топливно-энергетического комплекса, пусковых установок ракет, летательных аппаратов и др. объектов от поражения молнией, а также для борьбы с опасными

природными явлениями, такие как смерчи, град, сильные ливни, лесные пожары, вызываемые грозами, и др. явления.

Заряженные частицы в атмосфере (электроны, генерируемые космическими лучами, радиоактивностью и другими факторами) являются основными источниками возникновения ионизации воздуха и играют существенную роль в процессе осадкообразования и возникновения грозового электричества в естественных условиях [4,14,32,60,248]. Влияние заряженных частиц на интенсивность осадков в атмосфере рассматривалось в ряде работ [73,79,173,230]. В связи с отсутствием математической модели молнии рассмотрим экспериментальную модель электрического разряда облака, составленную рядом авторов [14,168,241 и др.]

Известно, что конвективные облака при развитии генерируют собственное электромагнитное излучение. Импульсное электромагнитное излучение несет определенную информацию об интенсивности электрических явлений, обусловленных микрофизическими и термодинамическими процессами. Импульсное радиоизлучение в виде пакетов импульсов формируется в результате разрядной деятельности сигналами различной длительности, спектр которых лежит в пределах 1-600 мс [80]. В предгрозовой стадии длительность пакетов импульсов находится в пределах 1-20 мс. При переходе облака в грозовую стадию возникают пакеты импульсов с максимумом около 100 мс.

Приоритетным периодом воздействия на грозу (искровой электрический разряд в виде молнии) с целью ее подавления является предгрозовая стадия длительностью 2-7 мин. В этот период времени происходит образование токопроводящего канала. Лабораторные исследования показали, что при напряженностях электрического поля $5 \cdot 10^5 - 10^6$ В/м в воздухе формируются микроскопические токопроводящие нити, названные стримерами. Первоначальная длина этих нитей изменяется от 10^{-2} м до 10^1 м, достигая в поперечном сечении $10^{-2} - 10^{-1}$ мм. Последовательно

сливаясь вместе стримеры образуют каналы токопроводящей плазмы, по которым происходит основной разряд облака [14]. При формировании линейной молнии выделяют следующие стадии развития: начальный ступенчатый лидер, встречный лидер, возвратный удар, стреловидный удар, новый возвратный удар и так далее повторяющаяся последовательность лидеров, образующая пакеты импульсов.

Имеется несколько методов искусственного изменения электрического состояния конвективного облака с целью предотвращения гроз. К активным электрическим методам относятся методы введения электрических зарядов в облако. Согласно современным представлениям о строении грозовых облаков концентрация заряженных частиц с значениями напряженности ($10^5 - 10^6$ В/м) происходит в небольших объемах, формируемых в восходящих и нисходящих струях [166]. Для инициирования грозового разряда на землю или между внутри облачными образованиями необходимо достижение критических значений напряженности поля и создание электропроводящего канала для прохождения электрического заряда. Минимальная длина искусственно создаваемого канала должна быть 100-200 м, а минимальная концентрация электронов в нем $10^7 - 10^8/\text{см}^3$ [173].

Исследования по искусственному вызыванию молний активным методом с помощью металлических нитей, поднимаемых к облаку ракетой, проводились в США, Франции, Японии, Китае и др. странах. Метод осуществляют путем запуска к грозовому облаку ракеты с прикрепленной к ней тонкой металлической проволокой с заземлением [79]. Для разряда грозовых облаков на землю при критической напряженности приземного электрического поля 4-7 кВ/м необходимо создание импульса напряженности электромагнитного поля по направлению к облаку (запуск ракеты), а электропроводящим каналом для прохождения к земле электрического заряда служит металлическая проволока.

Воннегут и Мур предложили воздействовать на электрическое состояние конвективных облаков внесением в них электрических зарядов, генерируемых коронированием с тонкой проволоки, находящейся под высоким напряжением. Колгейт осуществил подачу ионизированного воздуха в облако через полиэтиленовую трубу длиной 350 м, находящуюся под напором воздуха, нагнетаемого мощным вентилятором [173].

Другим способом для уменьшения зарядов в облаке является засев кучево-дождевых облаков «мякиной» - волокнами из диэлектрического материала. Такие волокна сбрасываются с самолета при напряженности электрического поля 50 кВ/м в количестве 4кг/км [216].

Электростатический метод, обеспечивающий защиту от молнии, предложен во Франции с использованием устройства для рассеяния радиационных туманов посредством ионизации воздуха высоким напряжением по патенту Франции № 2650938. Воздействие на электрические заряды в атмосфере предлагается осуществлять путем запуска привязанного аэростата с металлизированной оболочкой на высоту от 0,1 до 1 км. Металлизированный слой соединяют с тросом, намотанным на барабан лебедки. Нижний конец троса заземляют. В результате протекания тока по тросу уменьшается объемный электрический заряд в атмосфере, снижается вероятность молниевых разрядов.

Воздействие на облака электронными пучками из генераторов сильноточных релятивистских электронных пучков как средство борьбы с грозами путем снижения напряженности электрического поля облаков до безопасных значений рассмотрен в монографии [79].

В нижней атмосфере естественный поток заряженных частиц преимущественно вторичного космического излучения состоит в основном из электронов. Авторами работы [230] предложено проводить воздействия на облака потоками искусственного ионизирующего излучения. Поток заряженных частиц, направляемых в облако, генерируется ускорителем

элементарных частиц, устанавливаемым на борту самолета, облетающего облако.

Предлагаемый метод для инициирования грозовых разрядов [138], отличается тем, что для инициирования грозовых разрядов в атмосфере создают ионизированный канал в виде потока заряженных частиц термоионизационным методом. Молниевому разряду в естественных условиях, как было показано выше, предшествует образование быстро протекающего процесса формирования длинного, с малым поперечным сечением ионизированного канала, состоящего из электронов [173]. Разработка искусственных источников ионизации для создания искусственного ионизированного канала основывается на пиротехническом способе диспергирования реагента, рассмотренном в пп. 5.1.

Методика применения пиропатронов ПВ-26 ФХС с легкомоторных самолетов для борьбы с лесными пожарами изложена в руководящем документе [116]. Высота запуска изделия ПВ-26 ФХС с пиротехническим составом для образования термоионизационного канала составляет 1000-1200 м, максимальное количество генерируемых электронов - 10^{18} на 1г реагента.

Пример реализации разряда конвективного облака состоялся 18 августа 2008 г. над Финским заливом. Над акваторией залива во второй половине дня (15-16 ч) располагалась гряда конвективной облачности с нижней границей на высоте 600 м и верхней границей 3000 м. Вдоль гряды с северной стороны у боковой границы облаков с легкомоторного самолета на высоте 2900 м с интервалом 7 км были выпущены 5 изделий ПВ-26 ФХС. В результате в 4-х случаях наблюдался молниевый разряд с верхней границы облаков к нижней границе в течение горения ПС, под облаками наблюдался слабый ливневой дождь, естественных молниевых разрядов не наблюдалось.

Перспективными устройствами ввода в атмосферу могут служить устройства для отстрела пиропатронов АСО-2И с воздушного судна, противогородовые ракеты типа «Ас», «Алан-3», «Алазань-9» [1,140],

предназначенных для запуска с противорадиолокационных установок «Элия МР-60» и «Элия-2-60», а также изделия фейерверочного типа с пусковыми одноствольными и многоствольными установками [140] и др. изделия, снабженные пиротехническим составом по патенту РФ 2090548, описанному выше.

Проведенные испытания искусственного разряда электричества облаков ракетами класса «земля - воздух» показали, что определяющее значение имеет не только напряженность приземного электрического поля, но и ее изменение во времени, а также расстояние от очага грозовой активности до устройства, с которого производится искусственное вызывание молнии. Восстановление молниевой активности происходит в течение нескольких минут. Момент воздействия следует выбирать в последней стадии естественного восстановления критической величины электрической напряженности поля, за 10-15 с до начала разряда. В этот момент изменение напряженности ($\Delta E/\Delta t$) меньше 50 В/(м·с), а $E > 4$ кВ/м. Искусственный разряд влияет на электрическую активность грозового облака. После инициированного разряда электрическая напряженность и молниевая активность в грозовом облаке убывают, а количество осадков вблизи разрядного канала увеличивается

Приведенное обоснование метода для разряда электричества облаков указывает на принципиальную возможность применения кассетных фейерверочных генераторов для создания искусственного ионизированного канала молниевых разрядов на земную поверхность. Термоионизационный метод является оперативным и безопасным для окружающей среды, может быть использован как в стационарном, так и мобильном вариантах. Экономическим достоинством фейерверочных генераторов является невысокая стоимость запуска одного изделия по сравнению с ракетными изделиями.

Выводы к Главе 5

Рассмотрен термоконденсационный способ генерации заряженных аэрозолей. Пиротехнический состав для генерации состоит из смеси порошкообразного металлического горючего (магний или его сплавы), окислителя (калиевая селитра) и небольших добавок органического вещества (смола СФ-0112А, карбамид или аминотетразол). Продукты горения ПС при $T=3000-4000\text{K}$ представляют собой различные соли и окислы в виде твердых частиц размером $0,00075-0,75$ мкм эмитирующие электроны при охлаждении до температуры $700-800\text{K}$.

Рассчитана продолжительность сохранения предельной максимальной температуры на траектории движения источника в зависимости от его скорости и коэффициента турбулентной диффузии по Ричардсону. На основе максвелловского распределения электронов по скоростям выполнен строгий расчет количества электронов эмиссии с горячих частиц. Электрическое поле положительного заряда препятствует удалению электронов эмиссии от поверхности эмитирующей частицы, возвращая их назад в частицу. Покинуть частицу способны лишь электроны, энергии которых превышают их взаимодействие с положительным зарядом частицы. Поэтому нижняя оценка количества электронов эмиссии даже при $T = 2000\text{K}$ и при небольшом значении термоэлектронной работы выхода электронов не превышает 2000 электронов с частицы радиуса $5 \times 10^{-5}\text{см}$. Время существования свободных электронов не превышает $0,2\text{с}$.

На основании известных теоретических представлений установлено, что все электроны эмиссии пошли на образование отрицательных ионов молекул кислорода. Исходя из того, что при температурных условиях до 2000K сохраняется достаточно высокая плотность атмосферного воздуха, а значит, и частота столкновений молекул с ионами, предполагается, что и

при таких высоких температурах все отрицательные ионы, захватывая несколько нейтральных молекул, превращаются в легкие ионы.

Образовавшиеся легкие ионы, непосредственно с момента начала термоэлектронной эмиссии, направленным и диффузионным потоками попадают как на эмитирующие частицы, так и на более холодные частицы без эмиссии. Однако попадание отрицательных ионов на эмитирующие частицы уменьшает их положительный заряд, который препятствовал выходу большого количества электронов эмиссии. Поэтому считается, что в конечном счете попадание отрицательных ионов на частицы эмиссии в среднем не уменьшает их заряд, который неизбежно компенсируется дополнительным выходом электронов. Ионы попадают только на частицы без эмиссии, которые и приобретают отрицательный заряд.

Охлажденные аэрозольные частицы в облачной среде с учетом их гигроскопичности превращаются в положительно или отрицательно заряженные капли. Большинство гидратированных отрицательных ионов поглощается облачными каплями, увеличивая их размеры. При достижении каплями размеров радиусом в 18-20 мкм начинается их электрическая коагуляция.

Степень точности расчета электрической коагуляции по известным формулам определяется, прежде всего, взятым значением коэффициента захвата E при столкновении капель. Выполненный на первых двух временных шагах строгий расчет электрической коагуляции первоначально заряженных капель показывает, что уже через 3с после образования заряженных капель формируется концентрация положительно заряженных капель с зарядом $\sim 4000e^+$ и радиусом 14,7 мкм, которая равна $2,53 \times 10^5$ капель на литр облачной среды. Взаимодействия этой концентрации с естественной системой облачных капель с радиусами до 10 мкм и их концентрацией в несколько тысяч в литре среды, к тому электрически заряженных отрицательно приводит к гравитационной коагуляции капель –

выпадению осадков. Для определения интенсивности осадков, их продолжительности и общего количества требуются отдельные исследования.

Глава 6. Оценки ИВО и перспективные направления развития методов борьбы с лесными пожарами

6.1. Численные и натурные эксперименты по оценке ИВО

Результаты теоретических работ по ИВО, выполненные сотрудниками ГГО в предыдущие годы, могут быть использованы в проблеме борьбы с лесными пожарами, в частности по оценке пригодности облаков к ИВО, продолжительности и интенсивности осадков [14, 24, 70, 95, 218 и др.]. С практической точки зрения важным является не только правильный выбор облака для воздействия, но и установление времени воздействия, определяющего точность попадания искусственных осадков в зону пожара [223, 224].

Полученные в результате расчетов данные о времени начала осадков, переходе от умеренных к ливневым и их окончании, позволяют решить ряд практических задач, связанных с тушением пожаров и снижением КПО. К их числу относятся:

- расчет воздействия для совпадения зоны осадков с кромкой пожара;
- совпадение зоны интенсивных осадков с зоной наибольшей горимости;
- выпадение осадков на определенном расстоянии перед зоной пожара для предотвращения его дальнейшего распространения.

Для решения этих задач необходимо провести оценку мощности облака, определить его координаты по отношению к очагу пожара, направление и скорость перемещения облака, возможное изменение его траектории после засева. Имея эти данные, можно рассчитать расстояние от

точки воздействия на облако до точки в зоне пожара, в которой необходимо получить огнегасящий эффект.

Искусственное вызывание осадков на лесные территории может производиться не только с легкомоторных ВС, но и средневысотных типа Ан-26Б, Ан-32п и др. типов, снабженных автоматизированной системой отстрела пиропатронов. В связи с этим целесообразно рассмотреть засев конвективных облаков, состоящих из переохлажденных облачных капель пиропатронами ПВ-26 с 2% составом AgI и ПВ-26ФХС. Для этого воспользуемся расчетами, выполненными применительно к случаю введения реагента в верхнюю часть облаков различной мощности, приведенными в работах [220, 222, 253, 276].

При проведении вычислений выполнялись следующие условия:

-Воздействие производится на конвективное облако капельно-жидкой структуры, мощностью 2,00; 2,34 и 2,66 км с температурой на верхней границе -6 ,- 8 ,- $10^{\circ}C$ соответственно.

-Водность g_w в облаке имеет максимум на высоте $2/3$ от нижней границы.

-Воздействие производится реагентом, 1г. которого выдает 10^{12} активных частиц.

-Реагент вводится в облако на 100 м ниже его верхней границы.

-Частицы реагента, введенные в облако, распространяются вследствие турбулентного перемешивания изотропно. Предложенная задача решалась с помощью расчетной схемы, предложенной в работе [145].

При динамическом засеве таких облаков происходит дополнительное выделение скрытой теплоты кристаллизации, которая способствует дополнительному усилению конвективной неустойчивости и, как следствие, увеличению выпадающих осадков.

Результаты расчетов, выполненных применительно к введению реагента в верхнюю часть облака различной мощности приведены в работах

[219, 220]. Расчеты, проведенные для жидкокапельного облака мощностью 2,00; 2,34 и 2,66 км с температурой на верхней границе -6, -8, -10 град. соответственно приведены в работе [219]. Выпадение осадков при чисто водяном состоянии облаков столь же естественно, как и в облаках смешанной фазы [242,248]. Летом повторяемость водяных осадкообразующих облаков по данным самолетного зондирования составляет на ЕЧ России и Западной Сибири 50-60%, в Восточной Сибири и Приморье – 83-89% [57]. Расчет интенсивности осадков из водяных облаков выполнен в работе [246]. Параметры облаков и облачных систем, пригодных для ИВО, приведены в таблице 6.1 [3, 24, 38, 64, 66, 229 и др.].

Таблица 6.1 - Диапазон значений параметров облаков и облачных систем, пригодных для ИВО, по метеорологическим условиям и данным радиолокационных наблюдений [64].

Параметры облака	Классы облаков и облачных систем			
	Cu Cong	Cb	As-Ns	As-Ns-Cb
$H_{н.г.}$, км	≤ 1,0 - 1,5	≤ 1,5 - 2,0	0,1 - 1,0	0,1 - 1,0
$H_{в.г.}$, км	1,6 - 6,0	5,0 - 8,0	1,0 - 5,0	1,0 - 7,0
ΔH , км	≥ 0,6 - 5,0	≥ 3,0 - 8,0	0,5 - 5,0	0,5 - 5,0
$t_{в.г.}$, °C	0 -20	-18 до -60	-26 до -60	-18 до -60
w , м/с	1,0- 12,0	2,0 - 40,0	0,02 - 0,2	0,08 - 30,0
K , м ² /с	10 - 300	200 - 1500	13 - 15	50 - 1000
q , г/м ³	0,1 - 1,5	0,5 - 10,0	0,1 - 0,3	0,1-10
P , кг/м ²	0,01 - 4,8	2,7 - 9,5	0,02 – 0,4	0,02 - 0,41
Zd , дБз	10 - 28	28 - 75	8- 28	28 - 68

При разработке рекомендаций были использованы численное моделирование конвективной облачности [141,158,225], численное моделирование облаков слоистых форм [25,92,197,204] теоретическое и

экспериментальное исследование распространения реагента в облаке и около облачном пространстве [85,93,122].

Установлено, что для конвективных облаков мощностью 2000 м. и 2500м. с целью искусственного вызывания осадков достаточно создание в подоблачном слое одного-двух источников заряженного реагента типа ПВ-26 ФХС. Учитывая это, по экспериментальным данным выделен класс мощных кучевых облаков, часть которых переходит в дождящие при воздействии с применением одного изделия. К этому классу относятся облака с температурой на верхней границе $t_{в.г}$ в интервале от минус 8 до минус 12 °С и мощностью теплой части ΔH не менее 2 км при диаметре основания D около 4 км².

Общие рекомендации для выбранных типов облаков по использованию реагентов приведены в таблице 6.2. Приведенные рекомендации при ограниченности информации о входных параметрах могут корректироваться в процессе опытов, если по фактическим результатам воздействий оперативно выявится заведомо отличный от расчетного эффект.

Таблица 6.2. Нормы расхода реагентов

Тв.г.°С	ΔH ,км	D,км	САГ-П	САГ-ПМ	ПВ-26	САГ-ФХС	Факел
0 ÷ -8	2-3	≤ 4	2	1	4	1	1
-8 ÷ -12	≤ 2	≤ 4	1	1	3	1	1
	2-4	≤ 4	2	1	5	1	1
	4-6	4-8	2	1	5	2	1
≤ -13	2-4	≤ 6	1	1	3	1	1
	4-6	≤ 6	2-3	1	3	2	1

При использовании в качестве реагента изделий САГ-ФХС (ПВ-26 ФХС) следует руководствоваться инструкцией [116], но при этом следует применять не более одного изделия при мощности облака 2,5 км и более.

Воздействие на слоистообразную облачность, наблюдаемую над лесными территориями весной и осенью, производится твердой

углекислотой. Рекомендации и оценки результатов ИВО приведены в работах [5,11,17,64,197,271 и др.].

6.2. Физическая оценка эффективности ИВО для тушения лесных пожаров

Проблема оценивания эффективности ИВО на лесные территории возникла с момента первых попыток применения лесопожарной авиацией засева облаков реагентами для тушения лесных пожаров [8,10,121,150,250]. Количество выпадающих осадков является одной из важнейших характеристик оценивания эффективности ИВО. Получение информации об осадках на больших площадях даже при отсутствии пожаров является очень сложной задачей в силу их значительной пространственно-временной изменчивости [34,231]. В зоне лесных пожаров неприемлемы традиционные методы измерения количества осадков. В связи с этим необходимы разработки более перспективных методов измерений. К таким методам оперативного получения информации о количестве осадков и их интенсивности в настоящее время следует отнести радиолокационный метод [3,16,226], СВЧ - радиометрию и спутниковые измерения [8,100,101,227 и др.].

На начальном этапе работ по ИВО на лесные пожары в конце 60-х и 70-х годах XX столетия эффект выпадения осадков определялся в результате визуальных наблюдений по принципу выпали или не выпали осадки на очаг пожара. После подтверждения факта выпадения осадков из облаков оценивался результат их действия на пожар. При этом определяли:

- размеры зон осадков по направлению переноса засеянного облака и перпендикулярно к нему;

- интенсивность выпадающих на пожар осадков и их огнегасящую эффективность (накрытие всей площади пожара, частичное попадание на пожар, полное или частичное погашение огня на кромке пожара, снижение интенсивности горения и т. п.).

Результаты воздействий при оперативном проведении работ анализировались по данным наблюдений за числом случаев выпадения осадков, их продолжительностью, площадью выпадения, изменением параметров облака (высота границ, вертикальные движения, изменение водозапаса, характеристики радиоэха).

Особенность ИВО на лесные территории заключается в том, что при тушении лесных пожаров нет инструментальных измерений количества выпавших осадков. Объективными причинами этого являются подвижность кромки пожара (скорость распространения верхового пожара), отсутствие наземных средств измерения количества выпавших осадков, испарение осадков в пламени пожара и др. причины.

С другой стороны, несмотря на это, обусловленное активными воздействиями выпадение осадков на очаг пожара имеет огнетушащий эффект, что в большей степени повышает значимость оценивания эффективности активных воздействий на процессы интенсификации осадков в облачных системах различных форм [8,10,15,119].

Количество осадков при выполнении работ по ИВО на пожар оценивается по огнегасящему эффекту в зависимости от вида пожара и количества воды, необходимого для его погашения, определенного экспериментальным путем. Зоны выпадения искусственно вызванных осадков сравниваются с зонами естественного выпадения осадков [8].

Зоны выпадения естественных осадков имеют форму эллипса или овала, вытянутых вдоль направления ветра. Длина зоны осадков одного облака колеблется от 3 до 30 км (в 70 % случаев от 4 до 14 км), ширина - от 2 до 18 км (в 70 % случаев - от 2,5 до 5 км). Средний объем конвективного облака мощностью от 2,5 до 3 км составляет от 9 до 10 км³. В процессе роста мощность облака может увеличиться в 2-3 раза. Если принять среднюю водность облака, равной 1 г/м³ (изменяется от 0,01 до 8 г/м³), то из него может быть получено от 9 до 10 тыс. т воды, а с учетом коэффициента

регенерации (около 4,2) этот объем увеличивается до 37 - 42 тыс. т.

Для практики тушения и для оценки эффективности искусственного вызывания осадков важно знать, какое количество осадков может обеспечить полную ликвидацию лесного пожара [8]. Чем больше приходится на единицу площади горючего материала P , кг/м², способного к горению, тем большее количество влаги необходимо для смачивания территории до степени, при которой прекращается всякое горение.

Пожары, при которых горят только покров, сухая трава, сухие ветки, хвоя и листья, наблюдаются в основном весной, когда подстилка еще не просохла. Запас горючих материалов P в этом случае составляет от 1 до 2 кг/м². Расход воды на тушение 1 м² горячей кромки таких пожаров невелик - от 1 до 3 л, что соответствует от 1 до 3 мм выпадающих осадков. При заглубившихся пожарах летом и осенью, когда горят покров и подстилка (количество горючих материалов на единицу площади составляет от 2 до 18 кг/м²), количество влаги, необходимое для тушения огня, увеличивается по сравнению с весенними пожарами в 5-10 раз. Количество осадков, выпадающих из одного облака после воздействия, колеблется от 2-3 до 12 мм. В связи с этим возникает необходимость повторного инициирования ИВО при наличии благоприятных метеорологических условий [116].

При проведении работ по ИВО для снижения класса пожарной опасности лесов необходимость повторного инициирования осадков также связана с тем, что кроны деревьев поглощают до 70% выпадающей влаги. Классические методы оценивания количества выпавших осадков: метод отношений и метод исторической регрессии, а также рандомизированные эксперименты [140,142] не нашли применения в практике борьбы с лесными пожарами искусственно вызываемыми осадками.

Результаты вызывания осадков на лесные территории, проводимые ФГУ «Авиалесоохрана» на территории Российской Федерации в 2000-2006гг., приведены в приложении и обобщены в табл. 6.5. В различные годы

ИВО на лесные территории для снижения КПО и тушения лесных пожаров применяли авиабазы: Амурская, Дальневосточная, Забайкальская, Западно-Сибирская, Иркутская, Красноярская, Северо-Западная, Северная, Сыктывкарская, Томская, Тюменская, Уральская, Ханты-Мансийская, Читинская, Якутская.

Характерные результаты были получены Сыктывкарской авиабазой в 1999г. при засеве мощного кучевого облака с вертикальной мощностью 2,5-3,0 км для снижения 5 КПО реагентами [108], ливневые осадки наблюдались около 2-х часов. На этой же авиабазе в 2000г. осадки были вызваны на 10 пожаров пиропатронами ПВ-26 с реагентом AgI , из которых 5 пожаров были погашены.

Реагенты с йодистым серебром применялись в 2000г. и в 2002г. с эффективностью вызывания осадков 47% в 2000г. и тушения пожаров 23 из 60 (38%); в 2002г. было проведено 2 воздействия 20 пиропатронами на 2 пожара из них один был погашен (табл. 6.3). По экспериментальным данным, опубликованным в [59], из 21 конвективного облака, засеянного реагентами с йодистым серебром, осадки наблюдались в 17 случаях (81%). По данным [150,183] вероятность вызывания осадков из мощных кучевых облаков ($\Delta H \geq 2,5$ км) реагентами с йодистым серебром составляет 70-80%. Более низкая вероятность вызывания осадков при тушении лесных пожаров реагентами с йодистым серебром объясняется наличием более «теплых облаков», когда вершины облаков не достигают температурного порога срабатывания реагента и необходимостью засева облаков с меньшей мощностью. С 2002г авиабазами ФГУ «Авиалесоохрана» реагенты с йодистым серебром не использовались (табл. 6.3)

Всего за 2000-2006гг. заряженными гигроскопическими реагентами было произведено 643 воздействия на мощные кучевые облака, использовано 2103 пиропатрона ПВ-ФХС, количество пожаров, на которые выпали осадки - 281; погашено - 177(63%).

Таким образом, анализ результатов выполненных к настоящему времени экспериментальных работ по ИВО на лесные территории для снижения КПО и тушения лесных пожаров, позволяет сделать вывод о том, что при определенных условиях воздействия [116,121] заряженными гигроскопическими реагентами приводят к изменению микроструктуры засеянных облаков, выпадению осадков, снижению КПО, тушению лесных пожаров.

Таблица 6.3.Использование реагентов для тушения лесных пожаров в макетах пиропатронов ПВ-26

Воздействия	Реагент	год						
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Количество воздействий, вкл. профил.	ПВ-ФХС	83	59	109	176	62	16	138
	ПВ-AgJ	127		2				
Использовано пиропатронов	ПВ-ФХС	162	159	459	692	179	86	366
	ПВ-AgJ	297		20				
Количество пожаров,на которые попали осадки	ПВ-ФХС	44	16	38	112	18	11	42
	ПВ-AgJ	60		2				
Количество погашенных пожаров,(%)	ПВ-ФХС	26(59)	8(50)	21(55)	71(63)	13(72)	9(82)	30(71)
	ПВ-AgJ	23(38)		1(50)				
Количество воздействий без выпаден. осадков,(%)	ПВ-ФХС	21(25)	16(27)	31(28)	37(21)	2(3)	5(31)	9(6)
	ПВ-AgJ	40(31)		1(50)				

Проведенные работы по ИВО гигроскопическими реагентами, генерируемыми пиротехническим путем, с мелкими гигроскопическими частицами диаметром менее 1мкм подтверждают теоретические исследования, приведенные выше о возможности модификации конвективных облаков путем засева их небольшим количеством гигроскопического реагента.

Произведем оценку количества искусственно вызванных осадков для ликвидации пожаров на лесных площадях осадков за 2000-2006гг. Среднее количество воды по экспериментальным данным[8] для тушения горючих материалов 1-2кг/м²составляет 2л, 5-15 кг/м² – 10л, 20-30 кг/м² – 20л. Данные о количестве воды(выпавших осадков) для того, чтобы погасить пожары на площадях, указанных в табл. 6.3, приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4.Оценка количества искусственно вызванных осадков за 2000-2006гг.				
Год	Площадь погашенных пожаров, га	Количество осадков, тонн		
		минимальное	среднее	максимальное
2000	16693	333860	1669300	3338600
2001	945	18900	94500	189000
2002	6570	131400	657000	1314000
2003	74496	1489920	7449600	14899200
2004	13379	267580	1337900	2675800
2005	2215	44300	221500	443000
2006	19030	380600	1903000	3806000

Для самолета Бе-200п поднять такое количество воды по минимуму понадобилось бы от 5500 до124000 вылетов.

6.3. Экономическая оценка эффективности ИВО для снижения КПО и тушения лесных пожаров

Ущерб от лесных пожаров ежегодно исчисляется миллиардами рублей, при аномальной пожарной опасности жаркого лета 1972г. или 2010г. ущерб от лесных пожаров может исчисляться десятками и сотнями миллиардов рублей. Экономические последствия жаркого лета-2010 рассмотрены в ряде публикаций [63,210,256,288 и др.] Следует отметить, что лесные пожары происходят ежегодно, нанося ущерб народному хозяйству.

Существующие в настоящее время методики определения ущерба не всегда учитывают возможные потери от лесных пожаров [61,123,126,128,129,134 и др.]. Суммарный ущерб от лесного пожара включает[143]:

- стоимость потерь древесины на корню в средневозрастных, приспевающих, спелых и перестойных насаждениях;
- ущерб от повреждения молодняков естественного и искусственного происхождения;
- ущерб от повреждения ресурсов побочного лесопользования;
- расходы на тушение лесных пожаров;
- стоимость сгоревших объектов и готовой продукции в лесу(снижение стоимости объектов и готовой продукции, поврежденных пожаром);
- расходы на расчистку горельников и дополнительные санитарные рубки в насаждениях, поврежденных лесными пожарами;
- ущерб от снижения почвозащитных, санитарно – гигиенических, водоохранных и других средообразующих функций леса;
- ущерб от загрязнения воздушной среды продуктами горения;
- ущерб от гибели животных и растений, включая занесенных в Красную книгу Российской Федерации;
- другие потери.

По очень осторожным подсчетам экологов экономический ущерб от пожаров составляет не менее 25 тыс. долларов на 1 га. Таким образом, в

масштабах страны отсутствие действенной системы лесоохраны в 2010 году обошлось минимум в 375 миллиардов долларов[36,210,288].

Свои подсчеты экологи основывают на данных Всемирного центра мониторинга пожаров, согласно которым площадь, пройденная пожарами на природных территориях РФ с начала 2010 года по 13 августа, составила более 15 миллионов гектаров (с учетом возможной погрешности, не менее 10-12 миллионов гектаров). Вместе с тем, по данным Рослесхоза и МЧС, пожарами за тот же период пройдена в десять раз меньшая площадь, а затраты на преодоление существующих пожаров составляют 12 миллиардов рублей[288].

Расчеты экологов основаны на двух показателях: стоимость деловой древесины и стоимость стандартных средств восстановительных работ. При этом в них не учитываются расходы по уходу за лесными культурами первые 5-10 лет после их посадки, а также гибель и восстановление растений и животных, в том числе, занесенных в Красную книгу и ценных с хозяйственной точки зрения. Кроме того, в таких оценках не учтена стоимость экосистемных услуг, которые предоставляли людям сгоревшие леса, считают экологи: производство кислорода, поглощение углекислого газа, защита от эрозий, рекреационные услуги являются главной ценностью погибших природных сообществ.

Таким образом, по мнению экологов, реальный ущерб, нанесенный огнем природным территориям и экономике страны, многократно выше официального. Столь значительный ущерб, считают экологи, вызван отсутствием системы государственного управления лесами. Кроме того, в 2010 году от огня пострадали многие особо охраняемые природные территории (ООПТ). По данным Минприроды, пожары в 2010 году были зарегистрированы в 60 федеральных заповедниках и национальных парках. Число пострадавших региональных ООПТ нуждается в уточнении.

Среднегодовые площади пожаров характеризуют только площадь, пройденную пожарами. Гибель древостоя происходит не на всей площади пожара. Площадь с полностью погибшим древостоем называется гарью. Следовательно, для определения потерь лесных ресурсов от пожаров требуется найти среднегодовые площади гарей по различным хоз. секциям и, в общем, по лесхозу, федеральному округу и РФ в целом. Методика определения потерь лесных ресурсов от пожаров разработана на примере Енисейского лесхоза Красноярского края[42].

Для определения среднегодовых площадей, повреждаемых пожаром изучалась книга учёта пожаров Енисейского лесхоза с 1991-2003 гг, статистические данные по Красноярскому краю и по России в целом. Из отчётной документации выписывались следующие данные: общая площадь лесхоза, вид и интенсивность пожара по годам.

Затем определяются средние годовые площади пожаров по лесхозу и в отдельности по хвойным и лиственным насаждениям. Средние годовые площади определяются интервальным методом оценки с помощью пакета статистических программ при уровне доверительной вероятности 0.95. Результаты расчетов приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5. Площадь (S) погашенных лесных пожаров за 2000-2006 гг (га).

Авиабаза	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	итого за 7 лет
Амурская	30							30
Дальневосточная		500	800	190				1490
Забайкальская	35			309				344
Запад.-Сибирск.		240	**	**				240
Иркутская			20	11				31
Красноярская	26	130	3500	10170	7010	2215	19030	42081
Северная					1040			1040
Северо-Западная				58				58
Сыктывкарская	14503	70						14573
Томская	205			878				1083
Тюменская	**							0
Уральская		5	**		**			5
Ханты-мансийск.	376				5329			5705
Читинская	1348		1300	62700				65348
Якутская	170		950	180				1300
Итого	16693	945	6570	74496	13379	2215	19030	133328
Предот.-ащенный ущерб, млн.долл. (S*25000\$)	417,3	23,62	164,250	1862,40	334,5	55,45	475,7	~3333,2

6.4. Возможности применения подвижных комплексов в системе пожаротушения

Тушение лесных пожаров крайне затруднено в труднодоступных районах лесной и таежной зон. Патрулирование лесов лесопожарной авиацией (Ан-2п, Ан-26п и др.) связано с большими материальными и финансовыми затратами. Обнаружение лесных пожаров возможно с использованием космических наблюдений, но проблемы пожаротушения непосредственно связаны с наземными службами, оснащенными соответствующими техническими средствами. Одним из таких средств может быть подвижный комплекс охраны лесов от пожаров, сочетающий наземные средства пожаротушения и беспилотные воздушные суда для оперативного анализа пожарной опасности, ИВО для снижения класса

пожарной опасности лесов, обнаружения и ликвидации лесных пожаров [1, 131, 132, 133, 260].

Для выполнения работ по ИВО могут использоваться беспилотные самолеты, оборудованные необходимой для проведения воздействий измерительной аппаратурой, системой радиообмена данными “Земля — борт — Земля” и средствами засева облаков [99, 254, 278]. В качестве реагентов для засева преимущественно конвективных облаков могут использоваться пиротехнические изделия с йодистым серебром или гигроскопическими веществами

Перспективным средством борьбы с лесными пожарами может стать искусственное создание облачных образований для нивелирования приземных температур в пределах 5К за сутки и изменения траекторий движения циклонов и антициклонов [127, 164].

Для управления авиационными работами и контроля результатов засева облаков применяют наземные автоматизированные радиолокационные метеорологические комплексы, самолетные и спутниковые системы видеосъемки и др. способы и технологии.

Разработанные в ГУ «ГГО» в девяностых годах реагенты и технологии их использования [105, 106, 107, 113, 117, 118 и др.] позволяют проводить защиту лесов от пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов совместно с традиционными средствами пожаротушения, используемыми при борьбе с лесными пожарами [35, 123, 252].

В последние десятилетия все проводимые АВ на облака осуществляются при широком использовании метеорологических радиолокаторов (МРЛ) [16, 38, 39, 229], обнаруживающих облака и устанавливающих их параметры как до АВ, так и после них. В этих целях широкое применение в Росгидромете нашли стационарно установленные метеорадиолокаторы типа МРЛ-5, зачастую не обзорающие пространство в

тех районах, где возникают лесные пожары и существует необходимость проведения АВ на облака.

В связи с приведенным выше возникла необходимость использования малогабаритных метеорадиолокаторов (МГМРЛ, типа ART-2000 и др.), устанавливаемых на летательном аппарате или автомашине, способной смещаться в район планируемого ИВО.

Известные параметры МГМРЛ[254], к которым принадлежат наиболее современный наземный вариант бортового радиолокатора типа «Контур-К» или МГМРЛ-А, разработанный и выпускаемый ООО «Контур-НИИРС», а также существующего на сети Росгидромета высокопотенциального метеолокатора типа МРЛ-5, для сравнения приведены в таблице 6.6.

Из таблицы следует, что РЛС типа ART-2000, «Контур-К» и МГМРЛ-А способны обнаруживать облака и осадки, хотя уступают возможностям МРЛ-5. Следует отметить, что относительно высокий метеопотенциал РЛС «Контур-К» и МГМРЛ-А достигнут за счет увеличения чувствительности приемника и уменьшения затухания сигнала в их антенно-волноводных трактах [228].

Известно, что по данным «Контур-К» на расстоянии более ~ 25 км невозможно достоверно проводить классификацию облаков, из которых выпадают или в которых отсутствуют осадки, фиксируемые между высотой нулевой изотермы (в летний период она на высоте ~ 3-4 км) и земной поверхностью. Это связано с тем, что ширина луча (d) диаграммы направленности (ДН) антенны «Контур-К» при диаметре параболической его антенны $d = 76$ см равна $\theta \sim 3^\circ$.

Другие модификации этого радиолокатора при $d = 56$ см имеют $\theta = 4^\circ$ и при $d = 42$ см имеют $\theta = 5^\circ$. На удалении, например $R \geq 25$ км «Контур-К» при угле места его антенны в 0° обозревает пространство выше уровня нулевой изотермы.

Подвижный комплекс возможен в следующем составе:

- Кунг-фургон, изготовленный на базе автомобиля КАМАЗ и др. в комплектации с трейлером;
- подвижный вариант приема спутниковой информации;
- беспилотный летательный аппарат (самолет) ZALA 421-04м;
- беспилотный летательный аппарат (вертолет) ZALA 421-02;
- малогабаритная МРЛ;
- аэрологический комплекс LAP-3000;
- средства связи и управления;
- метеорологический комплекс;
- средства искусственного вызывания осадков и пожаротушения.

Таблица 6.6. Параметры малогабаритных МРЛ в сравнении с МРЛ-5

№ п/п	Параметры измерений	ART-2000	Контур-К	МГМРЛ-А	МРЛ-5
1	Длина волны, см	3,0	3,2	3,14	3,14
2	Диаметр зеркала, м	0,3	0,76	1,5	4,5
3	Сектор обзора, град.	100 по азимуту, 60 по углу места	360	360	360
4	Потребляемая мощность, кВт	4	1	4	12
5	Вес, кг	8,5-10,6	50	450	Не ограничен
6	Обнаружение зон осадков, км	420 с высоты до 3000м	~ 25	~25	По РД[21]

Вариант размещения технических средств на автомашине приведен на рис. 6.1.

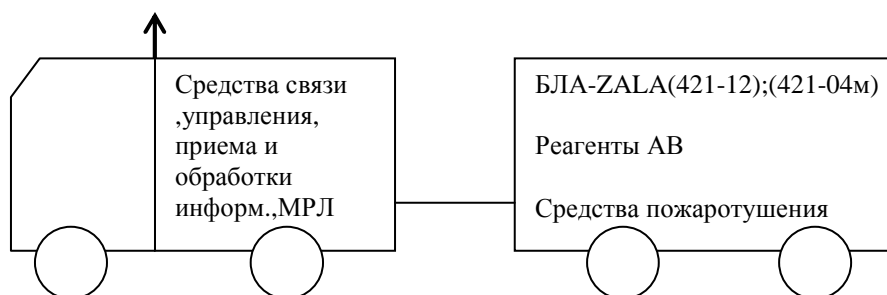


Рисунок 6.1. Схема подвижного комплекса

6.5. Применения беспилотных воздушных судов

В табл. 6.7 приведены параметры беспилотных воздушных судов, выпускаемых отечественной промышленностью РФ, предлагаемые для использования лесопожарными службами для определения лесопожарных коэффициентов, ИВО для профилактических работ по снижению класса пожарной опасности лесов и тушению лесных пожаров[21]. ZALA 421-02 один из самых крупных беспилотных вертолётов в России. Этот аппарат отличается увеличенной массой полезной нагрузки и высокой продолжительностью полета. Наличие вертикального взлета и посадки позволяет использовать ZALA 421-02 при отсутствии специальных площадок. ТТХ вертолета позволяют установить на его борту видеокамеру и тепловизор высокого разрешения, дистанционный лазерный газоанализатор, гаммаспектрометр, радар с синтезированной апертурой.

БЛА ZALA 421-04 М самолет с оптимально сбалансированными массогабаритными и техническими характеристиками. На борту БЛА штатно установлена цифровая фотокамера, а в отсек полезной нагрузки устанавливается сменный блок видеокамеры или телевизора на гидростабилизированной платформе. Беспилотный самолет запускается при помощи эластичной или пневматической катапульты и не требует специально оборудованной взлетно-посадочной полосы.

Таблица 6.7 Параметры беспилотных воздушных судов

№ п/п	Параметры единиц измерений	ZALA 421-02 (вертолет)	ZALA 421-04м (самолет)	ZALA 421-09 (самолет)
1	Радиус действия, км	50	25	250
2	Продолжительность полета, ч	6	2	10,5
3	Диапазон скорости, км/ч	0-90	65-120	90-130

4	Максимальная высота полета, м	3000	4000	3000
5	Габариты (ширина, длина, высота), м	0,67; 2,64; 0,94	1,6; 0,62	3,9; 2,5
6	Максимальный взлетный вес, кг	95	4,2	70
7	Вес полезной нагрузки, кг	50	1	10
8	Силовая установка	ДВС	Электро-двигатель	ДВС
9	Навигация	GPS/Glonas	GPS/Glonas	GPS/Glonas
10	Взлет/посадка	Вертикально	Катапульта, парашют	ВПП



Рисунок 6.2. Беспилотный вертолет ZALA 421-02 [21].

Особенностью аппарата является режим автоматического удержания в поле зрения камеры.



Рисунок 6.3. Беспилотный самолет ZALA-421-04[21].

Самолеты планируется использовать, прежде всего, для обеспечения информационной поддержки наземных пожарных команд при тушении крупных лесных пожаров, а также для патрулирования локальных участков лесного фонда с целью обнаружения возгораний, мониторинга действующих торфяных пожаров с использованием оптического и инфракрасного каналов, осмотра и фотодокументирования состояния гарей, оперативного осмотра лесных участков с целью исследования состояния лесных массивов. Кроме того в настоящий момент ведутся работы по интеграции беспилотных комплексов в информационную среду специализированного программного обеспечения семейства "Ясень" (ООО "Компания "Инком") в качестве информационного компонента.

В небо беспилотник взлетает при помощи эластичной катапульты, а посадка производится на парашюте. Масса самого летательного аппарата — 4,2 кг. В случае потери связи летательный аппарат самостоятельно вернется к месту старта и произведет посадку. Наземная часть радиокomплекса оборудована мачтой с автоматической следящей системой за местоположением летательного аппарата. В качестве прибора наблюдения на самолет устанавливается либо видеокамера с оптическим десятикратным увеличением, либо тепловизионная камера.

Кроме того, на каждом БЛА штатно установлении фотоаппарат позволяющий получать фотографии требуемого качества, которые могут быть использованы для оперативного картографирования и формирования доказательной базы в ходе расследования в случае незаконных вырубок. Высота полета беспилотного летательного аппарата составляет от 50 до 4000 м. Радиус устойчивой связи с пунктом управления составляет 25 км.

6.6. Аэрологические наблюдения

Измерению профиля ветра в нижней атмосфере при проведении разведки погоды БЛА, прогнозировании распространения пожаров и искусственном вызывании осадков на лесные пожары необходимо уделять

большое внимание. Для этого подвижный пункт управления активными воздействиями необходимо оснастить нижним тропосферным профайлером. Радиолокационные системы непосредственного измерения скорости и направления ветра на разных высотах являются важным инструментом метеорологических наблюдений, поскольку позволяют оперативно в режиме реального времени отслеживать величины профиля ветра в точке установки комплекса.

В настоящее время имеется несколько модификаций профайлеров. Наиболее распространенными являются технические средства фирмы «Вайсала» [254]. Имеются следующие разработки фирмы «Вайсала»: LAP-3000, LAP-8000, LAP-12000, LAP-16000, которые соответствуют высоте зондирования 3,0 км, 8,0 км, 12,0 км и 16,0 км соответственно.

Наиболее востребованной является информация о характеристиках ветра до высоты 3.0 км. В связи с вышеизложенным ниже рассмотрена возможность применения подвижного варианта LAP-3000, представленного на рисунке 6.4. Принцип работы ветрового профайлера основан на отражении (рассеянии) радиоволн определенного диапазона частот от неоднородностей атмосферы: ветровых турбулентностей, восходящих и нисходящих потоков, слоев с резким изменением температуры и влажности, облаков, осадков, переносимых ветром скоплений насекомых, и измерении доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала. Полный вектор скорости ветра получается совместной обработкой сигналов, полученных от разнесенных в пространстве нескольких приемных пунктов.

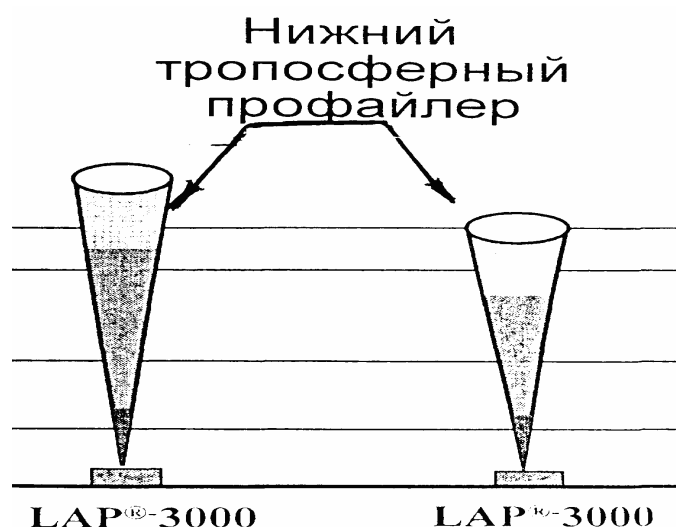


Рисунок 6.4. Профайлер LAP-3000, рекламируемый фирмой «Вайсала»

6.7. Система измерения фактических метеорологических величин

Система измерения фактических метеорологических величин включает: автоматическую метеорологическую станцию на базе автомобиля, оборудованную средствами измерения фактических метеовеличин: давления, температуры, влажности, направления и скорости ветра, высоты нижней границы облаков, метеорологической дальности видимости.

На подвижном комплексе будет функционировать автоматическая метеорологическая станция (АМС) типа АМС-2000[289]. Эта АМС предназначена для непрерывного измерения, обработки, отображения и регистрации следующих метеорологических параметров:

- атмосферного давления;
- температуры воздуха;
- относительной влажности воздуха;
- параметров ветра (скорости, направления);
- высота нижней границы облако (ВНГО);
- метеорологическая дальность видимости (МДВ).

Технические характеристики АМС – 2000 приведены в таблице 6.7.

Таблица 6.8 Технические характеристики АМС – 2000

Наименование параметра и размерность	Значение параметра
1 Диапазон измерения атмосферного давления, гПа	от 600 до 1100
1.1 Предел допускаемой основной погрешности измерения атмосферного давления, гПа	$\pm 0,3$
2 Диапазон измерения температуры воздуха, °С	от -40 до +60
2.1 Предел допускаемой основной погрешности измерения температуры воздуха, °С	$\pm 0,5$
3 Диапазон измерения относительной влажности воздуха, %	от 0,8 до 100
3.1 Предел допускаемой основной погрешности измерения относительной влажности воздуха, %	± 3
4 Диапазон измерения скорости ветра, м/с	от 0,5 до 60
4.1 Предел допускаемой основной погрешности измерения скорости ветра, м/с	$\pm(0,5+0,05V^*)$
5 Диапазон измерения направления ветра, угловые градусы	от 0 до 360
5.1 Предел допускаемой основной погрешности измерения направления ветра, угловые градусы	± 5
6 Диапазон измерения ВНГО, м	от 15 до 2000
6.1 Предел допускаемой основной погрешности измерения ВНГО: - в диапазоне от 15 до 100 м, - в диапазоне свыше 100м,	± 10 ± 7
7 Диапазон измерения МДВ, м: - при измерительной базе 50 м - при измерительной базе 70 м - при измерительной базе 100 м	от 30 до 4000 от 40 до 6000 от 60 до 8000
7.1 Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения МДВ, % - менее 200 м - от 200 до 400 м - от 400 до 1500 м - от 1500 до 3000 м - от 3000 до 8000 м	± 15 ± 10 ± 7 ± 10 ± 20

В состав АМС -2000 входят следующие функциональные части :

- автоматизированное рабочее место (АРМ);
- канал измерения атмосферного давления;
- канал измерения температуры и влажности воздуха;
- канал измерения параметров ветра;
- канал измерения ВНГО;
- канал измерения МДВ;
- канал отображения метеоинформации;
- комплект мачт метеорологических;
- комплект вспомогательного оборудования.
- автономные индикаторные устройства.

Центральной частью метеостанции является автоматизированное рабочее место (АРМ), которое собирает данные со всех измерительных каналов, обрабатывает их и выдает на индикацию в канал отображения метеоинформации. Проводимые АМС измерения метеопараметров поступают на АРМ, в состав которого входят:

- персональный компьютер (ПК), состоящий из:
 - системный блок;
 - жидкокристаллический монитор;
 - клавиатура;
 - мышь;
- плата расширения RS232 - RS485 портов;
- принтер для распечатки отчетов и графиков;
- устройство бесперебойного питания для защиты ПК от кратковременных падений напряжения в сети переменного тока 220 В;

- сетевой фильтр;
- программное обеспечение (ПО) метеостанции.

Основным элементом АРМ является ПК с установленным на нем ПО, которое предназначено для выполнения следующих функций:

- обеспечение связи со всеми измерительными каналами и прием результатов измерений от них;
- математическую обработку полученных данных:
- обеспечение контроля выбросов;
 - пересчет значений с учетом поправок;
 - осреднение данных на установленном интервале;
 - вычисление производных метеорологических величин;
 - статистическая обработка данных;
- отображение текущей метеоинформации на экране монитора ПК АРМ и АИУ ;
- создание и распечатка отчетов и графиков изменения метеопараметров;
- выдача «штормовых предупреждений»;
- контроль аварийных ситуаций.

ПО позволяет полностью автоматизировать процесс метеорологического обеспечения различных потребителей. Автоматизация охватывает следующие этапы процесса:

- измерение метеорологических величин;
- обработка результатов измерений, включающая в себя контроль качества полученных данных, ввод поправок и осреднение;
- вычисление производных метеорологических величин[100,102];

- ведение архива метеорологических данных с заданным интервалом записи;
- формирование отчетов и графиков;
- передача текущей метеоинформации различным службам.

Распространение текущей метеоинформации различным службам, а также поступление её на рабочее место оператора выполняется с помощью автономных индикаторных устройств (АИУ), отображающих метеоинформацию АМС-2000. АИУ устанавливаются в помещениях служб и соединяются с АРМ через линии связи (ЛС). Максимальное число АИУ, подключаемых к одной ЛС, не превышать 10 шт.

6.8. Измерение осадков

Измерение осадков выполняется дождемерами, осадкомерами, плювиографами на стационарных метеостанциях, а для больших площадей радиолокаторами [3,16,139,229].

Радиолокационный метод наблюдения позволяет получать более объективную и полную информацию об облаках, облачных системах, осадках, грозах и др. явлениях. Существующие автоматизированные системы МРЛ Аксопри, Метеоячейка, Мерком и др. предназначены для автоматизированного сбора, обработки, анализа, представления, накопления, хранения и передачи радиолокационной информации об облаках и осадках.

Например, технология применения автоматизированной системы «МЕРКОМ»[3] для распознавания явлений погоды, измерения осадков и ИВО базируется на современных достижениях радиометеорологии и опыте, накопленном в научных исследованиях за последние десятилетия[16,38,229,270 и др.]. Составной частью системы «МЕРКОМ» может являться обеспечение решения следующих задач при ИВО для снижения КПО и тушения лесных пожаров:

-повышение информативности и совершенствование сверхкраткосрочных и краткосрочных прогнозов погоды;

-диагностика развития или диссипации облачности в работах по ИВО;

-измерение интенсивности и количества выпавших осадков;

-получение карты накопленных сумм осадков и др. информация.

Измерение мгновенных полей интенсивности осадков осуществляется в каждом цикле обзора. Измерение количества осадков осуществляется путем интегрирования осадков за любой желаемый отрезок времени, за весь период дождя ,за сутки и т.д. до года.

Отображение, документирование и архивирование карт количества осадков может осуществляться в виде карт с изолиниями по любому количеству градаций или в виде цифрокарт, отображаемых на фоне изолиний количества осадков и карты местности. Изложенная методика является существенным дополнением для определения КПО лесов и оценивания эффективности ИВО для тушения лесных пожаров.

На рис. 6.5 представлена карта накопленных сумм осадков за 16 июля 2006г. в районе Санкт-Петербурга в период проведения саммита глав государств и правительств [5].

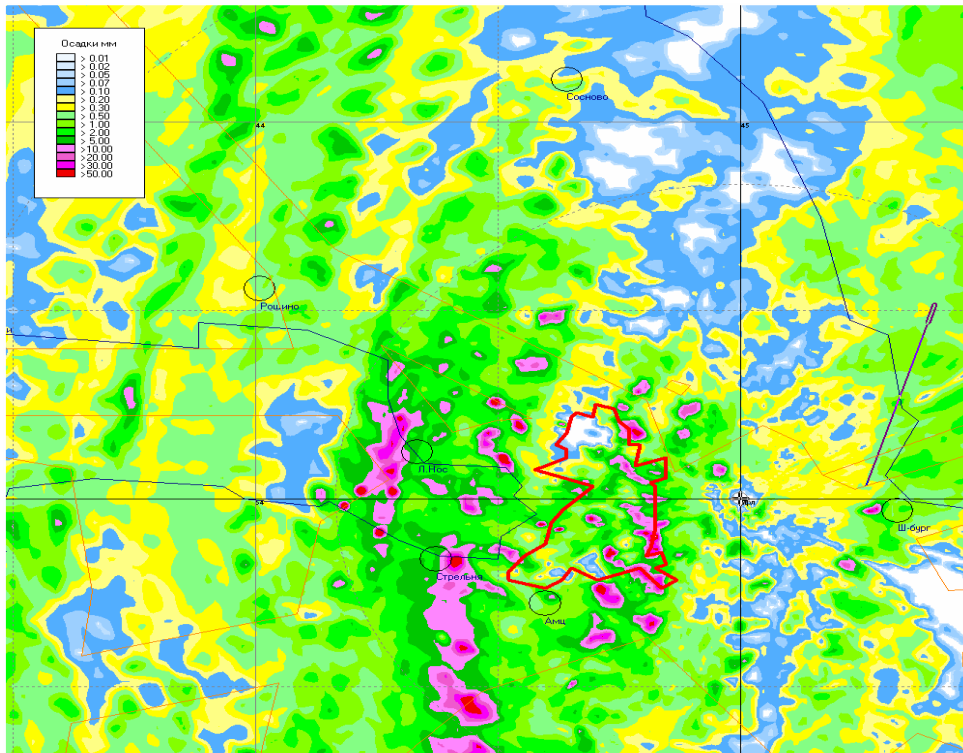


Рисунок 6.5. Накопленная сумма осадков 16.07.2006г. в районе Санкт-Петербурга

Отображение рассчитанных карт осуществляется в следующих вариантах:

- «сумма осадков за период» - карта рассчитанных сумм осадков за определенный период времени;
- «максимальные осадки за период» - карта выделенных за определенный период времени максимальных значений интенсивности осадков;
- «интенсивные осадки за период» - осадки большой интенсивности;
- «опасные явления погоды за период» - карта суммированных за определенный период времени ОЯП (грозы, града).

Радиолокационные данные могут быть дополнены сопряжением с данными наземных, спутниковых и других источников информации. В системе сопряжения радарных данных с наземными метеостанциями, с данными метеорологических спутников, грозопеленгаторов, СВЧ измерениями необходимо предусмотреть приведение к единой системе координат и отображение на карте местности радарных и спутниковых

данных, данных метеостанций, аэрологических станций, грозопеленгаторов для сопоставления с работами по снижению КПО и очагами лесных пожаров.

6.9. Элементы технологии управления искусственным вызыванием осадков в системе пожаротушения

Вариант построения региональной системы мониторинга и управления силами и средствами пожаротушения был спроектирован и сдан в эксплуатацию в 2004 г. ФГУП "Конструкторское бюро опытных работ" и ФГУ "Центральная база авиационной охраны лесов "Авиалесоохрана"[99].

По заданию Государственной лесной службы Министерства Природных ресурсов ФГУ ЦБ "Авиалесоохрана" совместно с ФГУП "КБОР" на основе современных информационных технологий разработали иерархическую структуру мониторинга и управления силами и средствами предупреждения и ликвидации лесных пожаров на территории России.

Основной задачей Регионального Центра является координация деятельности наземных и авиационных сил Министерства Природных ресурсов, осуществляющих лесопожарные мероприятия на территории РФ В рамках существующих уровней принятия решений в соответствии с основными функциями разработана структура информационного взаимодействия. В состав лесопожарного регионального центра (ЛРЦ) включается полностью оснащенный мобильный отряд пожаротушения.

Использование данных дистанционного зондирования Земли, в виде спутниковых снимков, позволяет вести постоянный мониторинг крупных лесных пожаров. Сбор и предварительная обработка более детальной информации, в том числе и фотопланы с мест лесных пожаров, передаются с использованием мобильных комплексов МСР-ТВ.М/ДП, расположенных непосредственно на технических средствах (летательных аппаратах и в командно-штабных автомашинах).

При облете места пожара оператор, находящейся на борту ВС, используя комплекс МСР-ТВ.М/ДП, определяет координаты пожара,

документально регистрирует с воздуха потенциально опасные участки распространения огня, формирует цветные фотопланы с привязкой к дате, координатам и передает их в ЛРЦ.

Работа аппаратуры возможна и в условиях высокой влажности и запыленности. Обеспечивается контроль и оценка результатов тушения пожаров авиационными и наземными методами, включая искусственное вызывание осадков. Система ЛРЦ позволяет более эффективно осуществлять координацию действий при оперативном маневрировании мобильными группами по тушению лесных пожаров в пределах региона. Планируется создание подобных центров в Сибирском, Уральском, Центральном и Северо-Западном округах. Благодаря комплексам МСР-ТВ обеспечивается автоматизированное предоставление сквозной информации по вопросам охраны лесов от пожаров органам власти и общественности.

Область применения: система мониторинга и управления силами и средствами применяется с целью информационного обеспечения правоприменительных функций (контроль и надзор), оперативной регистрации и информационного документирования нарушений требований природоохранительного законодательства и нормативных правовых актов в области охраны окружающей среды (теповизионный ИК-мониторинг природоохранных объектов в дневное и ночное время; формирование баз данных оперативного доступа, регистрации и поиска объектов учёта; определение местоположения диспетчерского пункта в системе GPS/GLONAS и привязка к местности; взаимодействие с ГИС для картографической привязки регистрируемых объектов и процессов с привязкой координат).

Машина видеонаблюдения, видеосвязи и пожаротушения (подвижный комплекс) предназначена для передачи видеорепортажей с места событий в центр, ведения видеозаписи и проведения видеоконференций между центром и оперативным штабом на месте событий. Совмещение машины

видеонаблюдения и видеосвязи с функцией пожаротушения обеспечивает следующие возможности: определение зон облачности и осадков; измерение фактических метеовеличин; измерение скорости ветра до высоты 3км: определение очагов пожаров; организация ИВО с пилотируемых и беспилотных воздушных судов; управление процессом ИВО; оценивание эффективности ИВО и пожаротушения.

Система радиообмена данными «Земля-борт-Земля», применяемая для управления пилотируемых и беспилотных воздушных судов, разработана АНО «АТТЕХ»[278] и техническими средствами для проведения работ по ИВО с беспилотных воздушных судов.

Для проведения сезонных работ в теплое полугодие по пожаротушению и ИВО на лесные территории используется большое количество трудовых ресурсов, разнообразных технических средств, воздушных судов, систем связи и управления, которые не находят применения в холодное полугодие. Система искусственного вызывания осадков, используемая для борьбы с лесными пожарами, может быть использована в различные сезоны года. В осенне-зимний период и ранней весной трудовые ресурсы и технические средства могут быть задействованы в природоохранных мероприятиях, метеозащите территорий (городов, автострад и др. объектов) от выпадения твердых осадков, гололеда, наледей на высоковольтных линиях электропередач, ИВО для создания снежного покрова на сельхозугодьях и лесных территориях, определения теплотерь в населенных пунктах, мониторинга теплотрасс, газопроводов, нефтепроводов и на др. работах.

Выводы к Главе 6

В главе приведены физические и экономические оценки ИВО на лесные территории. Работы по ИВО реагентами по патенту РФ 2090548 (ПВ-ФХС) проводились с 1992г. 15 авиабазами ФГБУ «Авиалесоохрана».

Оценен эффект искусственного вызывания осадков на лесные территории. Для проведения оценочных действий определяют:

- размеры зон осадков по направлению переноса засеянного облака и перпендикулярно к нему;
- интенсивность выпадающих на пожар осадков и их огнегасящую эффективность (накрытие всей площади пожара, частичное попадание на пожар, полное или частичное погашение огня на кромке пожара, снижение интенсивности горения и т. п.);
- результаты воздействий при оперативном проведении работ анализировались по данным наблюдений за числом случаев выпадения осадков, их продолжительностью, площадью выпадения, изменением параметров облака (высота границ, вертикальные движения, изменение водозапаса, характеристики радиоэха);
- количество осадков при выполнении работ по ИВО на пожар по огнегасящему эффекту в зависимости от вида пожара и количества воды, необходимого для его погашения, определенного экспериментальным путем.

Для практики тушения и для оценки эффективности искусственного вызывания осадков важно знать, какое количество осадков может обеспечить полную ликвидацию лесного пожара. Чем больше приходится на единицу площади горючего материала P , кг/м², способного к горению, тем большее количество влаги необходимо для смачивания территории до степени, при которой прекращается всякое горение. По данным ФГУ «Авиалесоохрана» установлены за 2000-2006 годы суммарные площади погашенных пожаров искусственно вызванными осадками, на основании которых рассчитано ежегодное количество искусственно вызванных осадков от минимальных до максимальных условий горения лесных территорий.

Площадь погашенных лесных пожаров ИВО за 2000-2007гг. составила 133328 га, из них Читинской авиабазой погашено ИВО 65348га, Красноярской – 42081га. Количество полностью погашенных лесных пожаров составило в 2005г. 82%, в 2001г. 50%. Количество вызванных осадков по экспериментальным данным для полного погашения пожаров за

эти годы в среднем составило 221500т и 94500т соответственно, что значительно превосходит возможности самолетов-танкеров по сливу огнегасящей жидкости(воды).

Оценка физической эффективности реагентов ПВ-ФХС и ПВ-26 с 2% составом AgJ проводилась в 2000г., количество погашенных пожаров реагентами ПВ-ФХС составило 59%, реагентами ПВ-26 38%. Количество воздействий ПВ-ФХС -83, ПВ-26 -127, соответственно, израсходовано пиропатронов 162 и 297, количество пожаров, на которые попали осадки 44-60, количество погашенных пожаров 26 -23. Меньший процент погашенных пожаров объяснялся слабой интенсивностью выпадающих осадков. В последующие годы изделия с AgJ практически не использовались.

В главе произведена оценка предотвращенного экономического ущерба ИВО за 2000-2006гг. По оценке экологов экономический ущерб от пожаров составляет не менее 25 тыс. долларов США. В соответствии с этой оценкой при площади погашенных пожаров 133328га предотвращенный ущерб составил 3333200 тысяч долларов США.

Рассмотрены дальнейшие перспективы и дано обоснование применения современных технических средств при организации пожаротушения ИВО состоящее из подвижного комплекса на базе автомобиля повышенной проходимости, снабженного беспилотными воздушными судами, малогабаритной МРЛ, профайлером LAP-3000, метеостанцией АМС-2000, средствами связи, управления и пожаротушения. В качестве реагентов для засева преимущественно конвективных облаков могут использоваться пиротехнические изделия в виде пиропатронов, изделий фейерверочного типа, противорадиолокационных ракет и др.

В последние десятилетия все проводимые АВ на облака осуществляются при широком использовании метеорологических радиолокаторов (МРЛ), обнаруживающих облака и устанавливающих их параметры как до АВ, так и после них. В этих целях предлагается

использование малогабаритного метеорадиолокатора (МГМРЛ типа ART-2000 или МГМРЛ-А), устанавливаемого на летательном аппарате или автомашине, способной смещаться в район планируемого ИВО на очаг пожара.

В главе предложены элементы технологии управления искусственным вызыванием осадков в системе пожаротушения на примере построения региональной системы мониторинга и управления силами и средствами пожаротушения на территории Дальневосточного Федерального округа с применением реально существующих систем связи, предложенных ФГУ «Авиалесоохрана».

Региональный центр по предупреждению и ликвидации лесных пожаров (ЛРЦ) был спроектирован и сдан в эксплуатацию в 2004 г. ФГУП "Конструкторское бюро опытных работ" и ФГУ "Центральная база авиационной охраны лесов "Авиалесоохрана".

Основной задачей Регионального Центра является координация деятельности наземных и авиационных сил Министерства Природных ресурсов, осуществляющих лесопожарные мероприятия на территории округа, в том числе путем информационной поддержки принятия стратегических управленческих решений на основе визуализации и углубленной аналитической обработки оперативной информации с применением комплекса специально организованных рабочих мест для персональной и коллективной аналитической работы. Дополнение табличных оперативных данных фото- и видеоматериалами повышает их информативность, обеспечивая обобщенное восприятие происходящих событий.

Предлагается дополнить региональный центр по предупреждению и ликвидации лесных пожаров подвижным комплексом для борьбы с лесными пожарами, содержащим технические средства искусственного вызывания осадков.аключение

Заключение

Основные результаты теоретических, экспериментальных и производственных работ, рассмотренных в диссертации, можно сформулировать следующим образом:

В диссертационной работе рассмотрены технологии искусственного вызывания осадков на лесные территории для снижения класса пожарной опасности лесов и тушения лесных пожаров. Представленные технологии в большей степени предназначены для предупреждения лесных пожаров в пожароопасные периоды, когда наиболее вероятно наличие ресурсной облачности для искусственного вызывания осадков. Проведенные исследования в ГГО им. А. И. Воейкова показали, что в среднем по территории России наблюдается от 4 до 8 дней в месяц в пожароопасный период года, когда возможно снизить класс пожарной опасности практически до нуля. Для расчета класса пожарной опасности лесов, как правило, используют шкалу проф. Нестерова и ее региональные варианты. Предложен новый метод оценки пожароопасности, учитывающий суточные изменения температуры и относительной влажности.

Впервые за последние 60-70 лет проведения работ по активным воздействиям на атмосферные процессы разработан и испытан в производственных работах новый заряженный аэрозольный реагент, не имеющий ограничений в применении, без температурного порога в отличие от твердой углекислоты и йодистого серебра. Приведено теоретическое обоснование применения заряженного аэрозоля, образующегося пиротехническим путем. Полученные в результате термоионизации отрицательные ионы идут на укрупнение облачных капель, а положительные ионы на образование ледяных кристаллов.

Впервые реагент и способы его применения запатентованы в Российской Федерации: патенты РФ: №№ 2061358, 2073969, 2075284, 2090548, 2090549, 2179800, 2181239, 2191499 и др. Разработаны и

внедрены руководящие документы по ИВО для снижения КПО и тушения лесных пожаров РД 52.04.628-2001, РД 52.04.674-2006.

Впервые разработан способ и устройство для ИВО из конвективной облачности с использованием баллоэлектрического эффекта при разбрызгивании водного аэрозоля, заряженных растворов гигроскопических веществ, в том числе морской воды, струйными форсунками, подана заявка на получение патента РФ на изобретение за № 2013107400.

Впервые разработан термоионизационный способ электрического разряда конвективного облака на основе применения пиротехнической генерации заряженного реагента по патенту РФ № 2090548, заявка на получение патента РФ на изобретение № 2013131639. Впервые дано объяснение электрической неустойчивости в конвективной облачности, состоящей из электрической неустойчивости первого рода (эффект Релея) и электрической неустойчивости второго рода (предел Имянитова), проявляющейся в разделении зарядов в конвективном облаке в следствие испарения, дробления облачных капель и кристаллов до достижения критических значений электрической напряженности.

Предложено использовать самолеты противопожарной авиации модифицированный Ан-2п, Ан-32п, Бе-12п, Бе-200п, Ил-76п и др. для ИВО водным аэрозолем при наличии ресурсной облачности. ИВО является наиболее эффективным средством пожаротушения (при соответствующих метеоусловиях), так как из одного засеянного реагентами конвективного облака может выпасть от 9-10 тыс. тонн воды до 37-42 тыс. тонн, тогда, как Бе-200п за одну заправку выливает на очаг пожара 6-12 тонн воды. Рассмотрена возможность использования современных струйных форсунок типа Turbotac для засева облачности водным аэрозолем. Преимуществом этого типа форсунок является распыление жидкости каплями размером от 5 до 300 мкм. Форсунки могут распылять суспензии, содержащие растворы и твердые частицы (например, смесь NaCl с цементом). Из 1 галлона (3,785 л)

жидкости получается 50 триллионов капель с общей площадью поверхности более 4700 м². При отсутствии благоприятных метеорологических условий для ИВО эти самолеты производят слив огнегасящей жидкости непосредственно на очаги пожаров.

Приведены формулы и графики для расчета количества осадков, выпадающих при воздействии на конвективные облака водным аэрозолем. Количество выпавших осадков зависит от мощности облака, количества введенного реагента, вертикальных токов в облаке и размеров вводимых в облако капель воды. Коэффициент использования облачной влаги достигает 60-65%. Расчетное время выпадения осадков после начала воздействия составляет 10-20 мин. Представлены рекомендации по введению реагента в облако: если воздействие производится на облако с прекратившимся восходящим потоком, то введение реагента выгоднее всего производить на высоте верхней границы облака; в случае восходящего потока целесообразно введение реагента под нижней границей облака.

При пиротехническом способе генерации средний диаметр образующихся заряженных аэрозольных частиц составляет 0,04 мкм, что соответствует естественным ядрам конденсации, участвующим в механизме осадкообразования. В реальном масштабе времени радиус капли на таких ядрах увеличивается не более чем до 1-2 мкм. Следовательно, необходим дополнительный механизм ускоренного роста капли до начала гравитационного укрупнения облачных частиц с целью искусственного вызывания осадков. В реальных условиях атмосферы таким механизмом является естественная ионизация облачной среды, при АВ искусственная электризация облачной среды заряженными аэрозольными частицами, образующимися пиротехническим способом.

Рассчитано количество гигроскопических положительно заряженных частиц и отрицательных ионов, возникающих при горении разработанных пиротехнических составов. Плотность пиротехнических составов по

патентам РФ 2090448, 2090549, 2179800 равна 2 г/см^3 , выход из одного грамма реагента составляет положительно заряженных частиц 5×10^{11} и до 10^{18} электронов, которые в течение 10^{-2} с становятся гидратированными отрицательными ионами.

Рассчитано количество гигроскопических положительно заряженных частиц и отрицательных ионов, возникающих при горении разработанных пиротехнических составов. Оценено время термоэлектронной эмиссии из нагретых до $T=3000\text{K}$ частиц гигроскопического реагента. Оценено время охлаждения плазменного образования с $T=3000\text{K}$ до температуры облачной среды и ее объем. Начиная с этого времени, искусственно образованные ионы создают заряженные облачные капли разного знака.

Установлена принципиальная возможность искусственного создания заряженных облачных капель, что должно приводить к их укрупнению до размеров осадков. При этом, как было указано выше, решающую роль играет термоэлектронная эмиссия с горячих гигроскопических частиц. Электрическое укрупнение капель начинается при достижении ими размера всего лишь в 1-2 мкм.

На основании проведенного анализа известных теоретических исследований роста водяной капли на солевом ядре записано дифференциальное уравнение конденсационного роста капли солевого раствора, начиная с момента полного растворения гигроскопического ядра, от формирования насыщенного раствора до прекращения конденсационного роста капли. Результаты решения уравнения конденсационного роста капли солевого раствора показывают, что влияние химического состава начального солевого ядра проявляется с двух сторон. Для размера сухого солевого ядра в 1,5 мкм капля указанных химических растворов может дорасти до 20 мкм (начала гравитационной коагуляции капель и выпадение осадков) за время, большее 30 мин. Установившаяся скорость падения капель в облачной среде радиуса 10 мкм равна 1,3 см/с, а для 15 мкм – 3 см/с. Следовательно, после

введения гигроскопического реагента радиусом в 1,5 мкм для появления осадков восходящие воздушные потоки должны удерживать эти частицы в верхней части облака в течение более 30 мин. Учитывая время жизни конвективной ячейки 30-40 мин, для ИВО нецелесообразно пользоваться частицами размером менее 2мкм.

Экспериментальные данные показывают, что ширина зоны осадков в значительной степени связана с мощностью облака и с расходом реагента. В среднем ширина зоны в полевых экспериментах составила 2-4км при мощности облака до 3км. Количество осадков Q можно оценить зная распределение частиц реагента внутри облака к моменту достижения облачными частицами размера приводящего к коагуляции и имея данные о росте частиц, падающих с различных высот. Приведены результаты расчета возможного количества осадков при воздействии разным количеством NaCl на облака различной мощности. При рассмотренных трех мощностях облачности значение Q стремится к $Q_{\text{макс}}$. Это свидетельствует о том, что, начиная с некоторого значения расхода реагента, дальнейшее его увеличение не приводит к изменению количества осадков.

В период 2000-2006гг заряженными гигроскопическими реагентами проведено 643 воздействия по искусственному вызыванию осадков для снижения класса пожарной опасности лесов и тушения лесных пожаров. Использовано 2103 экспериментальных пиропатрона в макетах пиропатронов ПВ-26. Осадки вызваны на 281 лесной пожар, из них ликвидировано 178 или 63% пожаров. Количество воздействий без выпадения осадков- 121 или 19 %. Потенциальный экономический эффект составил 3,3 млрд. долларов США.

Предложен подвижный комплекс для охраны лесов от пожаров, представляющий собой мобильную структуру, способную прийти на замену легкомоторной лесопатрульной авиации и практически решать задачи по обнаружению лесных пожаров, вести профилактические работы по снижению класса пожарной опасности лесов и тушению лесных пожаров

искусственным вызыванием осадков. Рассматриваемый комплекс практически может быть использован в течение всего календарного года для создания снежного покрова в лесах и на сельхозугодьях. Оснащение тепловизором и другой аппаратурой позволит определять теплопотери в холодное полугодие в населенных пунктах, контролировать движение по железным и шоссейным дорогам, определять загрязнения воды, почвы и атмосферного воздуха, вести мониторинг малых газовых компонент, способствующих потеплению климата и др. работы.

Приведена разработанная ФГУ ЦБ "Авиалесоохрана" совместно с ФГУП "КБОР" иерархическая структура мониторинга и управления силами и средствами предупреждения и ликвидации лесных пожаров на территории России на основе современных информационных технологий. Предложено в данную структуру включить подвижный комплекс искусственного вызывания осадков с системой обнаружения облачных образований, определения влагозапасов облаков, количества выпадающих осадков и управления работами по ИВО.

По результатам исследований опубликованы две монографии, 29 статей из них 5 в реферируемых трудах ФГБУ ГГО, разработаны три руководящих документа, получено 10 патентов РФ на изобретения, поданы 3 заявки на получение патентов РФ и др. публикации в научных трудах и журналах.

Список использованных источников

1. Абшаев М. Т. Состояние и перспективы развития работ по активному воздействию на гидрометеорологические процессы в странах СНГ.// М.: Метеоспектр. – 2013. - № 1. – С.124-138.
2. Абшаев М.Т. Вареных Н.М., Несмеянов П.А., Стасенко В.Н., Сидоров А. И., Соколовский, М.И., Корнеев В.П., и др. Технические средства с пиротехническими генераторами аэрозолей для АВ на облака.// Труды

Второй Всероссийской конференции «Современные проблемы пиротехники».- Сергиев Посад. - 2003.- С. 48-62.

3. Автоматизированная радиолокационная система «МЕРКОМ». Инструкция по эксплуатации. НПЦ «Экотехнологии» - Ставрополь - 2006.-61с.

4. Аджиев А.Х., Бейтуганов М.Н., Богаченко Е.М. Состояние и перспективы методов регулирования грозового электричества.// Активные воздействия на гидрометеорологические процессы. – Труды Всесоюзной конференции. – Л.: ГМИ. - 1990.- С. 420-425.

5. Айсин Д.Р., Гальперин С.М., **Козлов В.Н.**, Щукин Г.Г. Активные воздействия на облака и осадки в Санкт-Петербурге во время проведения саммита «Группы восьми». Труды ГГО.- 2009.- Вып. 556.- С.215-229.

6. Айсин Д.Р., Клинго В.В., **Козлов В.Н.** Теоретическое обоснование генерирования заряженного гигроскопического реагента пиротехническим путем. Доклады 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.- Изд. ЛКИ. - 2008. - С. 113-120.

7. Арабаджи В. И. Загадки простой воды.- М.: «Знание».- 1973. - 95с.

8. Арцыбашев Е.С. Тушение лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками из облаков.// М.: Изд. «Лесная промышленность». - 1973.- 88 с.

9. Арцыбашев Е.С., Губин П. А., Шишкин Н.С., Сумин Ю.П., Добротворский М.Н., Давиденко Э.П. Инструкция по тушению лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками из облаков // – Л., ЛенНИИЛХ. - 1974.

10. Арцыбашев Е.С., **Козлов В.Н.** Искусственное вызывание осадков на лесные пожары.//Материалы Межведомственного совещания «Повышение производительности и эффективности использования лесов на осушенных землях».- СПб. – 2008.- С.128-136.

11. Атабиев М. Д., Имамджанов А.А., Камалов Б.А., **Козлов В.Н.**, Усманов И. У., Щукин Г.Г. О проведении работ по метеозащите Ташкента 21 марта 2002 г.- Труды НИЦ ДЗА (Филиал ГГО). 2002. - Вып.4(552). – С.139-151.
12. Атмосфера. Справочник. – Л.: Гидрометеиздат.- 1991. – 510с.
13. Белая М.Л., Левадный В.Г. Молекулярная структура воды. М.: Знание. – 1987. – 63с.
14. Бекряев В.И. Молнии, спрайты и джеты. Монография. – Санкт-Петербург. – Изд. РГГМУ.- ISBN 978-5-86813-248-3. - 2009. - 96с.
15. Берюлев Г.П., Беляев В.П., Данелян Б.Г. Зимин Б.И., Колосков Б.П., Черников А.А. Оценка эффективности воздействий и количества дополнительных осадков из конвективных облаков.// Метеорология и Гидрология.-1995. - №4. - С. 66-86.
16. Берюлев Г.П., Голубев В.С., Колосков Б.П. и др. Радиолокационные измерения осадков и организация контрольных наземных наблюдений. // Труды ГГИ. – 1980. - Вып. 266.- С. 50-63.
17. Берюлев Г.П., Зимин Б.И., Колосков Б.П., Данелян Б.Г., Мельничук Ю.В., Рябова Р.Ю Проведение работ по искусственному увеличению атмосферных осадков самолетными методами. Методические указания: РД 52.11.637-2002. - СПб.: Гидрометеиздат. - 2002. - 32с.
18. Беспалов Д. П., **Козлов В.Н.**, Матвеев Л. Т. Психометрические таблицы. Л.: Гидрометеиздат. – 1972. – 236с.
19. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990, 685с.
20. Бородин В.А. и др. Распылители жидкости. – М.: Машиностроение. - 1967.
21. БПЛА-Орлан.2010. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bla-orlan.ru> (дата обращения 02.10.2010).
22. Браунер С. Адсорбция газов и паров. Т.1 Физическая адсорбция. М.: Иностранная литература. 1945 – 781с.

23. Будилова Е.П., Корниенко Е. Е., Леншин В.Т., Сталевич Д.Д. Натурные испытания смеси NaCl с цементом в качестве реагента для воздействия на мощные кучевые облака.// Труды ГГО. - 1968. - Вып.224. – С. 23-36.
24. Будилова Е.П., Иванова Т.В., Леншин В. Т., Хайбулина Л. С., Шишкин Н.С. К методике оценки водных запасов конвективных облаков.// Труды ГГО. - 1972. - Вып.278. – С. 142-152.
25. Буйков М.В. Численное моделирование облаков слоистых форм.// Обзор. - Обнинск.- 1978. – 62 с.
26. Будко Е.А., **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В., Окунев С.М., Щербаков А.П. Искусственное вызывание осадков на лесные пожары.// Тр. НИЦ ДЗА (филиала ГГО). - 2001. - Вып.3 (549). - С. 239-249.
27. Будко Е.А, Клинго В.В., **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В., Окунев С.М., Щукин Г.Г. Использование легкомоторных воздушных судов для искусственного регулирования осадков в интересах лесного хозяйства.// Тез. докл. научной конф. по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения окружающей среды в государствах-участниках СНГ, посвященная 10-летию образования Межгосударств. совета по гидрометеорологии. Секция 4. АВ на гидрометеорологические и геофизические процессы и явления. Гидрометеиздат. С-Пб.- 2002.-С.
28. Вагер И.А. Лабораторные опыты осаждения тумана диспергированной наэлектризованной водой.// Тр. НИУ ГУГМС. 1941.- Сер. 1.- Вып.1.- С.174-180.
29. Валендик Э.Н. Борьба с крупными лесными пожарами. – Новосибирск: Наука. - 1990. – 191 с.
30. Вангенгейм Г.Я. Метеорологическая обстановка лесных пожаров на Севере в 1936-1937 гг. // Борьба с лесными пожарами авиа-наземным методом. – Л.: Гослестехиздат. - 1939. – С. 77-104.

31. Вейнберг Б. П. К. теории осаждения облаков посыпанием их наэлектризованным песком.// Журнал Русского физ.-хим. об-ва.- Сер. Физ.- 1924. - № 5/6.
32. Веремей Н.Е. Электризация конвективных облаков и формирование грозových разрядов. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.meteoweb.ru/phen035.php> (дата обращения 09.07.2011).
33. Владимиров С.А. Оценка возможности эффективного воздействия на осадкообразование при засевах конвективных облаков каплями растворов гигроскопических солей.// Метеорология и Гидрология. - 2006. - №9. - С.21-28.
34. Воробьев Б.М. и др. Разработка рекомендаций по применению существующих и новых технических средств для регулирования осадков из конвективных облаков. Отчет о НИР (заключ.) //ГГО; – № ГР 01830044426; Инв. № 02860046257. – Ленинград, 1985. – Том 1 – 96 с.; Том 2 – 142 с.; Том 3 – 56с.
35. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы.- М.: Дэкс-Пресс.- 2004.- 312с.
36. Газета «Ведомости» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vedomosti.ru> (дата обращения 21.02.2011).
37. Гайворонский И.И., Зацепина Л.П., Серегин Ю.А. Результаты опытов воздействия на конвективные облака.// Изв. АН СССР.- ФАО. - 1970. - Т.6. - Вып. 3 – С. 252-258.
38. Гальперин С.М., **Козлов В.Н.**, Степаненко В.Д., Щукин Г.Г. Активные воздействия на облачные системы с целью регулирования осадков и молниевой активности// Труды ГГО. – 2009. - Вып.560. - С. 189-212.
39. Гальперин С.М., **Козлов В.Н.**, Караваев Д.М., Морозов В.Н., Щукин Г.Г. Обнаружение смерчей с помощью пассивно-активной радиолокации// Доклады 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. - Изд. ЛКИ. – 2008. - С.55-62.
40. Гирс С.П., Довгалюк Ю.А. О механизмах заряжения облачных капель в теплых облаках. Обзор. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. - 1975.- 51 с.
41. Гирс С.П., Шишкин Н.С. Об электрических свойствах мелкокапельных конвективных облаков.// Тр. ГГО. – 1969. – Вып. – 239. – С.62-69.
42. Глинка Н.Л. Общая химия.- Л.: Химия. – 1971. – 712с.
43. Громова Т.Н., Семенова Е. И., Чикирова Г. А.. Стабилизация и рассеяние водных туманов частицами гигроскопических веществ, вводимых в пиросоставах. // Тр. ГГО. – 1974. – Вып. 290. – С 112-119.
44. Гусев В.Г., Ирицын В.А., Ирицын Е.В. Прогнозирование параметров лесных пожаров и ресурсов для борьбы с ними. Санкт-Петербург: СПбНИИЛХ. - 2011. – 218с.
45. Де Бур Я.Динамический характер адсорбции.- М.: Иностранная литература. 1962 – 290с.
46. Довгалюк Ю.А., Оренбургская Е.В., Углонова Т.Л. Характеристики ресурсных конвективных облаков над лесными пожароопасными районами азиатской части РСФСР и отдельными засушливыми районами Европейской части СССР.// Л.: Гидрометеиздат.- 1991. - 88 с.
47. Довгалюк Ю.А., Ивлев Л.С. Физика водных и других атмосферных аэрозолей.// СПб: Издательство С.-Петербургского университета.-1998.-324 с.
48. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А. А., Стасенко В. Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А. В., Щукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I. Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока // Труды ГГО.- 2008. - Вып. 558. - С. 102-142.
49. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А. А.,

- Стасенко В. Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А. В., Щукин Г.Г. Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II. Микрофизический блок модели.// Труды ГГО.- 2010.- Вып. 562.-С. 7-39.
50. Доронин А.П., **Козлов В.Н.**, Титов А.Ф. Оценка пригодности внутримассовых слоистых и слоисто-кучевых облаков над северо-западными районами Европейской части СССР к активным воздействиям с целью вызывания осадков.// Труды ГГО. – 1991. – Вып. 536. – С. 76-81.
51. Доронин А.П., Белевич М.Ю., **Козлов В.Н.**, Кильчинский Е.Е., Шереметьев Р. В. Исследование фазового состояния внутримассовой и фронтальной облачности над Северо-Западным регионом России применительно к проблеме активных воздействий.// Труды ГГО.- 2010.- Вып. 561. - С. 242-265.
52. Доронин А.П., **Козлов В.Н.**, Щукин Г.Г. Исследование расслоенности внутримассовой и фронтальной слоистообразной облачности над Северо-Западным регионом России в естественных условиях и при активных воздействиях//. Труды ГГО. - 2010.- Вып. 562.- С. 170-189.
53. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. и др. Климатология. Л.: Гидрометеиздат. 1989. – 568с.
54. Дрофа А.С. Формирование микроструктуры облачной среды при введении гигроскопических частиц.// Изв. РАН. ФАО.- 2006.- Т.42.- №3 - С.355-366.
55. Дрофа А.С. Исследование воздействия гигроскопическими частицами на теплое конвективное облако по результатам численного моделирования// Изв. РАН. ФАО.-2010. Т.46. - №3. - С.357-367.
56. Друкарев Г. Ф. О заряде дождевых капель. - Изв. АН СССР. – Сер. Геогр. и геофиз. – 1944. – Т.8. - № 6. – С. 330-336.
57. Дубровина Л.С. Облака и осадки по данным самолетного зондирования – Л.: Гидрометеиздат.- 1982. – 216 с.

58. Дьяченко Ю.Д., Кудашкин Г.Д., Сидоров А.И., Силин Н.А., Шишкин Н.С. Разработка пиротехнического самолетного аэрозольного генератора для воздействия на облака.// Труды. ГГО. – 1981. - Вып. 439. – С.69-73.
59. Егоров В.В., Ильин С.Н., Кудашкин Г.Д., Мамедов А.Э. Предварительная оценка эффективности воздействий на мощные кучевые облака. // Тр. ГГО. – 1984. - Вып. 482. - С.117-122.
60. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Препринт. Физика грозových облаков.// Москва.- ФИАН.-2004.-30с.
61. Жуковский Е.Е. Метеорологическая информация и экономические решения.// Л.: Гидрометеиздат.- 1981. - 303с.
62. Зайцев В.А., Ледохович А. А.. Приборы для исследования туманов, облаков и измерения влажности. – Л.: Гидрометеиздат.- 1970. – 255с.
63. Заключение Общественной комиссии по расследованию причин и последствий природных пожаров в России в 2010 году [Электронный ресурс].URL:http://www.yabloko.ru/mneniya_i_publicatsii/2010/09/14 (дата обращения 05.03.2011)
64. Залиханов М.Ч., Щукин Г.Г., **Козлов В.Н.** и др. Временные методические указания по планированию, организации и проведению работ по искусственному увеличению осадков // - Нальчик, ВГИ. - 1997. – 49 с.
65. Замиралова В.Ф., Оребургская Е.В., Угланова Т. Л. О повторяемости условий благоприятных для искусственного вызывания осадков в пожароопасных районах Якутии и Камчатки.// Тр. ГГО. – 1983. - Вып. 469. - С 94-101.
66. Зацепина Л. П., Зимин Б.И., Поздеев В.Н., Серегин Ю. А. Оценка влияния воздействий на эволюцию конвективных облаков в Поволжье по данным эксперимента 1989г.// Труды ЦАО. - 1992. - Вып.177. - С.19-43.
67. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды. М.: Изд. МГУ, 1987, 168 с.

68. Зенин С.В., Полануер Б.М, Тяглов Б В. Экспериментальное доказательство наличия фракций воды. Ж. Гомеопатическая медицина и акупунктура. 1997.-№2.-С.42-46.
69. Зимин Б. И. Исследование процессов осадкообразования в конвективных облаках (по зарубежным данным). Обзорная информация.// Обнинск. – 1987. - Вып. 9. - 47с.
70. Зинченко А.В., Замиралова В.Ф. Оценка изменения среднего по площади количества осадков по результатам воздействий на отдельные конвективные облака.// Труды ГГО. – 1988. – Вып.517. – С. 10-17.
71. Ильин Б.В., Природа адсорбционных сил. - Л.: - 1952, 124с.
72. Имянитов И.М. К вопросу о механизме электростатического заряжения. – ДАН СССР. – 1958. – Т 121.- № 1. – С. 93-96.
73. Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М. Электричество облаков.// Л.: Гидрометеиздат, 1971.- 94 с.
74. Имянитов И.М., Михайловская В. В. Опыт исследования зарядов частиц осадков в свободной атмосфере.// Тр. ГГО. – 1960.- Вып. 97.- С. 16-33.
75. Имянитов И.М., Никандров В.Я. О возможности воздействия на электрические процессы в облаках.//Краткие тексты и тезисы докладов к совещанию по активным воздействиям на облака и туманы. – Л.: Изд. ГГО. – 1965. – С.138-142.
76. Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М. Действие электрических сил на развитие облака.// Тр. ГГО. - 1974 – Вып. 301. – С. 3-9.
77. Инструкция по выполнению полетов для активного воздействия на облака с целью тушения лесных пожаров искусственными осадками // Основные нормативные акты МГА, регулирующие выполнение авиационных работ в отдельных отраслях народного хозяйства. .М.: Воздушный транспорт,1986. – С. 229-238.
78. Камышанова В.А., Столярчук Л.В. Условия возникновения массовых лесных пожаров от гроз// Тр. ГГО. - 1984. – Вып. 474. – С. 120- 126.

79. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы.// Л.: Гидрометеиздат. - 1990. - 463с.
80. Кармов М. И., Бейтуганов М. Н. Оценка физической эффективности активного воздействия на конвективные облака по изменению характеристик их электромагнитного излучения // Труды Всесоюзной конференции «Активные воздействия на гидрометеорологические процессы». – Киев. - .1990. – С. 439-441.
81. Китайгородский А. И. Молекулярные кристаллы. М.: Наука. – 1971. – 424 с.
82. Климат Санкт-Петербурга и его изменения. Под редакцией Мелешко В.П., Мещерской А.В., Хлебниковой Е.И. – Санкт – Петербург: ГГО. –2010. – 256с.
83. Клинго В.В., **Козлов В.Н.** Использование гигроскопических веществ для активных воздействий на облака и туманы.// Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО).- 2001.- Вып.3 (549).- С. 239-249.
84. Клинго В.В., Кудашкин Г. Д., Файзуллин Б.Ш. Расчет числа столкновений частиц реагента с облачными каплями для оценки действия механизма контактной нуклеации.// Тр. ГГО. -. 1981. – Вып. 439. – С. 39-48.
85. Клинго В.В., Файзуллин Б.Ш. Расчет распространения в конвективных облаках льдообразующих аэрозолей, введенных в предоблачный слой.// Тр. ГГО.- 1984. - Вып.482. - С.20-29.
86. Клинго В.В., Файзуллин Б.Ш. Оценка числа частиц реагента , захваченных облаком при активных воздействиях.// Тр. ГГО. – 1991. – Вып. 536. – С. 42-47.
87. Клинго В.В., **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В. Пиротехнический способ генерации ионогенных гигроскопических аэрозолей. //– Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО).- 2001.- Вып.3 (549).- С.250-256.

88. Клинго В.В. Ионы естественной атмосферы как электростатические системы. //Сб. трудов Второй международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли». – С-Пб. - 1999. - С.232-238.
89. Клинго В.В. Фазовые переходы в ледяную фазу под влиянием электрического поля адсорбированных ионов.// Сборник трудов Второй Международной конференции “Естественные и антропогенные аэрозоли”. - Санкт-Петербург. - 1999. - С.43-46.
90. Клинго В.В. Влияние электрического заряда частицы - подложки на гетерогенный фазовый переход водяной пар-лед в облаках. Сборник трудов Второй Международной конференции “Естественные и антропогенные аэрозоли” - Санкт-Петербург. – 1999. - С.40-43.
91. Клинго В. В. К уточнению расчета работы по образованию гетерогенного зародыша на сферической подложке.// Тр. ГГО. – 1991. – Вып.- 536. – С.19-24.
92. Клинго В. В. Теоретические расчеты стимулирования адсорбированными ионами кристаллизации переохлажденных капель в облаках. Доклады XII международной конференции по атмосферным аэрозолям и нуклеации. — Вена. 1988. - с. 638—640.
93. Клинго В. В. Кристаллизация облачных капель под влиянием адсорбированных ионов // Тр. ГГО. – 1991. – Вып.- 536. – С. 25-33.
94. Клинго В.В., **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В. Исследование влияния ионогенного гигроскопического аэрозоля на фазовые переходы воды в облаках.// Материалы юбилейной конференции «Состояние и перспективы развития технологии и технических средств воздействия на гидрометеорологические процессы». Чебоксары, 12-14 августа 1999 г. - С.49-53.
95. Клинго В.В., **Козлов В.Н.** К теоретическому обоснованию применения ионогенных гигроскопических реагентов для вызывания осадков.// Тр. НИЦ ДЗА (филиал ГГО), Вып.3(549). - 2001 .- С. 11-19.

96. Клинго В.В., **Козлов В.Н.**, Щукин Г.Г. Физические основы образования заряженных гигроскопических частиц для искусственного регулирования осадков Тр. НИЦ ДЗА (Филиал ГГО). – 2002. - Вып.4 (552). - С.76-86
97. Клинго В.В., **Козлов В.Н.**, Айсин Д.Р. Формирование заряженного гигроскопического реагента для искусственного вызывания осадков// Тр.НИЦ ДЗА (Филиала ГГО).- 2005. - Вып.6 (554). - С.67-85.
98. Клинго В.В. ,**Козлов В.Н.** Об электрических процессах в облаках.// Тр. НИЦ ДЗА (Филиала ГГО).- 2002. - Вып.4 (552).- С.44-54.
99. Ковалев Н.А. Современные информационные технологии и перспективы создания регирнального ситуационного центра по мониторингу и ликвидации лесных пожаров. ФГУ «Авиалесоохрана». 2004г. – 7с.
100. **Козлов В.Н.** Расчет общего влагосодержания воздуха и водности облаков по наземным данным. // Тр. Л ВИКА. – 1969. - Вып. 549. - С. 18-24.
101. **Козлов В.Н.**, Матвеев Л.Т. Об использовании спутниковой информации для анализа полей основных метеорологических элементов в облачной атмосфере.// Метеорология и Гидрология .- 1971. -№11.- С. 19-26.
102. **Козлов В.Н.**, Матвеев Л.Т. Формирование полей влажности и облачности в пограничном слое атмосферы.// Тр. ЛГМИ.- 1974. – Вып. 51. - №3. - С. 50-59.
103. **Козлов В.Н.** Устройство для создания тумана и облаков.// Патент № 2045164. – Россия. – МПК А 01 G 15/00. - № заявки 93016204/23. – Заявл. 29.03.1993. - Оpubл. БИ № 28. – 1995г.
104. **Козлов В.Н.**, Мазуров Г.И., Мазурова Н.Н. Устройство для повышения температуры и увлажнения воздуха. Патент № 2060640. – Россия. – МПК А 01 G 15/00. - № заявки 93018803/15. – Заявл. 12.04.1993. Оpubл. 27.05.1996 г.
105. **Козлов В.Н.**, Окунев С.М., Фомин В.А. Способ регулирования осадков из конвективных облаков // Патент № 2061358. – Россия. – МПК А 01 G 15/00. - № заявки 93032141/23. – Заявл. 15.06.1993.- Оpubл. 10. 06. 1996 г.

106. **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В., Окунев С.М., Фомин В.А. Аэрозольный кассетный генератор.// Патент № 2073969. – Россия. – МПК А 01 G 15/00. - № заявки 93041432/23. – Заявл. 08.09.1993 .- Оpubл. 27.02.1997 г.
107. **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В., Окунев С.М., Фомин В.А., Пряхин П.Н. Способ управления погодой.// Патент № 2075284. – Россия. – МПК А 01 G 15/00. - № заявки 94004562/15. – Заявл. 08.02.1994 .- Оpubл. 20.03.1997 г.
108. **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В., Окунев С.М., Фомин В.А. Пиротехнический состав для вызывания осадков.// Патент № 2090548. – Россия. – МПК С 06 D 3/00, С 06 В 31/02, А 01 G 15/00.- № заявки 94004563/02. Заявл. 08.02.1994 .- Оpubл. 20.09.1997 г.
109. **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В., Окунев С.М., Фомин В.А., Соснов А.В. Состав для рассеивания облаков и туманов.// Патент РФ № 2090549. – Россия. – МПК С 06 D 3/00 , С 06 В 31/02, А 01 G 15/00.- № заявки 94004563/02. – Заявл. 08.02.1994 .- Оpubл. 20.09.1997 г.
110. **Козлов В.Н.** Управление атмосферными ресурсами для метеозащиты Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Гидрометеорология: наука и практика, современность и перспективы: Тез. докл. Междунар. симп., Санкт-Петербург, 12-14 ноября 1997 г. – СПб, 1997. – С. 70-71.
111. **Козлов В.Н.**, Лихачев А. В., Окунев С.М. Разработка ионогенного гигроскопического реагента для активных воздействий на облака.// Тезисы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 28-30 октября 1997г.- Нальчик, КБР.- 1997.- С.100-101.
112. **Козлов В.Н.**, Окунев С.М. Некоторые результаты воздействия на конвективные облака ионогенным гигроскопическим реагентом.// Тезисы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 28-30 октября 1997г.- Нальчик, КБР.- 1997.- С.99-100.

113. **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В. Пиротехнический состав для изменения атмосферных условий. Патент № 2179800. – Россия. – МПК А 01 G 15/00. - заявки 2000110405. – Заявл. 05.05.2000. - Оpubл. 27.02.2002 г.
114. **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В., Окунев С.М., Щербаков А.П. Тушение лесных пожаров искусственно вызванными осадками.// Тр. НИЦ ДЗА (Филиал ГГО). – 2002. - Вып. 4(552), С.152-164.
115. **Козлов В.Н.**, Щукин Г.Г. Разработка новой технологии искусственного регулирования осадков для борьбы с лесными пожарами. Тез.докл. участников совещания-семинара по решению лесопожарных проблем. С-Пб.- 2002.- 2с.
116. **Козлов В.Н.**, Клинго В.В., Лихачев А.В., Окунев С.М., Щербаков А.П. Щукин Г.Г. РД 52.04.628-2001. Инструкция. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов // - СПб.: Гидрометеиздат. - 2002.- 24 с.
117. **Козлов В.Н.**, Будко Е. А., Лихачев А. В. Пиротехнический состав для изменения погодных условий. Патент № 2181239. – Россия. – МПК А 01 G 15/00. - № заявки 2000110407. – Заявл. 05.05.2000 .- Оpubл. 20.04. 2002 г.
118. **Козлов В.Н.**, Будко Е. А, Лихачев А.В. Окунев С.М. Способ управления погодой. Патент № 2191499 – Россия. – МПК А 01 G 15/00. - № заявки 2000110406. – Заявл. 05.05.2000 .- Оpubл. 27.10.2002 г.
119. **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В. Окунев С.М., Щукин Г.Г., Щербаков А.П. Искусственное вызывание осадков для тушения лесных и торфяных пожаров.// Материалы научно-практической конференции «О мерах по совершенствованию борьбы с лесными и торфяными пожарами г. Вологда 28 ноября 2002г.» - Москва-2002.
120. **Козлов В.Н.**, Клинго В.В., Айсин Д.Р. Искусственное вызывание осадков заряженным гигроскопическим реагентом.// Доклады 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.// Изд. ЛКИ. - 2008. - С. 121-128.

121. **Козлов В.Н.**, Арцыбашев Е.С., Айсин Д. Р., Атабиев М.Д., Довгалюк Ю. А., Лихачев А.В. Окунев С.М., Щербаков А.П., Щукин Г.Г. РД 52.04.674-2006. Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от пожаров.// М.: Метеоагентство Росгидромета. – 2006. -118с.

122. **Козлов В.Н.** Методы искусственного вызывания осадков для борьбы с лесными пожарами.- Санкт-Петербург: Изд. Инфо-да. – –ISBN 978-5-94652-359-2 - 2011. – 202с.

123. **Козлов В.Н.**, Доронин А.П., Мазуров Г.И., Акселевич В.И. Возможности предотвращения засух искусственно вызванными осадками.// Метеоспектр. - 2012- № 1 - С. 88 – 99.

124. **Козлов В.Н.**, Клинго В.В. Теоретическое обоснование генерации заряженного гигроскопического реагента для искусственного вызывания осадков из облаков //Труды ГГО. – 2012. – Вып. 565. – С. 216-231.

125. **Козлов В.Н.** Искусственное вызывание осадков заряженным реагентом. Труды VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству 24-28 сентября 2012г СПб.// ФГБУ ГГО.- 2012. – С.127-128.

126. **Козлов В.Н.**, Доронин А.П. Экономические аспекты метеозащиты крупных городов.// Метеоспектр.- 2012. – Вып. 3. – С. 113-123

127. **Козлов В.Н.** Физические основы искусственного образования облачности в верхней тропосфере.// Труды ГГО. – 2014– В печати.

128. **Козлов В.Н.**, Мазуров Г.И., Акселевич В.И. Искусственное регулирование зимних ливневых осадков над городами. // Тр. ФГБУ ГГО. - Радиолокационная метеорология и активные воздействия.- Санкт- Петербург. – 2012. – С. 84 – 96.

129. **Козлов В.Н.**, Акселевич В.И., Мазуров Г. И. Метеоролого-экономическая модель метеозащиты мегаполиса.// Труды ГГО. – 2012. – Вып. – 566. – С. 182 – 202.
130. **Козлов В.Н.** Заряженный гигроскопический реагент для АВ на конвективные облака.// Тезисы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 24-28 октября 2011г. – г. Нальчик – ВГИ – 2011.- С. 118-120.
131. **Козлов В.Н.** Использование заряженных гигроскопических реагентов в предотвращении и тушении лесных пожаров.// Тезисы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – 24-28 октября 2011г. – г. Нальчик – 2011.- С. 121-123.
132. **Козлов В.Н.** К проблеме измерения осадков при тушении лесных пожаров.// Тезисы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – 24-28 октября 2011г. – г. Нальчик – 2011.- С.123-126.
133. **Козлов В.Н.** Подвижный комплекс для искусственного вызывания осадков при тушении лесных пожаров.// Тезисы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – 24-28 октября 2011г. – г. Нальчик – 2011.- С.116-118.
134. **Козлов В.Н.**, Емельянова Н.А., Коршун Н.А. Искусственное регулирование осадков.- Saarbrucken Deutschland. - Изд.: LFP LAMBERT Academic Publishing. - ISBN: 978-3-659-46160-6. – 2013.-372с.
135. **Козлов В.Н.**, Коршун Н.А. Метеорологический индекс пожарной опасности лесов. // Метеоспектр.- 2013. – Вып. 1. – С.85-95.
136. **Козлов В.Н.**, Коршун Н.А. Естественный природный реагент для активных воздействий на облака.- Метеоспектр.- 2013. – Вып. 3. – В печати.
137. **Козлов В.Н.**, Коршун Н.А. Способ и устройство искусственного регулирования осадков. – Заявка на патент РФ № 2013107400 от 19.02.2013.

138. **Козлов В.Н.**, Коршун Н.А. Способ инициирования грозových разрядов. - Заявка на патент РФ № 2013131639 от 09.19.07.2013.
139. Колосков Б.П., Мельничук Ю.В., Шипилов О. И. Использование радиолокационных данных об осадках для оценки результатов засева облаков. // Метеорология и гидрология.- 1987.- №2.-С. 19-26
140. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. Изд. РГГМУ. – Санкт Петербург. – 2012. – 342с.
141. Копанев И.Д. (1978). Снежный покров на территории СССР.// Л.: Гидрометеиздат.- 182с.
142. Корниенко Е.Е. Результаты эксперимента по воздействию на кучево-дождевые облака с целью искусственного регулирования осадков// Тр.УкрНИГМИ.- 1982. - Вып.187.- С.3-25.
143. Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов. // М.: Агропромиздат.- 1988. – 221 с.
144. Коротков А.И., Медведев Н.А. Элементарные процессы при рекомбинации заряженных частиц. // Чебоксары. – 1987.- 48 с.
145. Красновская Л. И. Физические основы искусственных воздействий на переохлажденные облака с помощью хладореагентов.// Тр. ЦАО.-1964.- Вып.58.-С.3-79.
146. Красногорская Н.В. Результаты измерения зарядов частиц осадков в свободной атмосфере. – Изв. АН СССР.- Сер. Геофиз. – 1956. - № 7. – С. 844-852.
147. Красногорская Н.В. Влияние электрических сил на коагуляцию облачных капель. – Метеорология и гидрология. – 1967.- № 3. – С.51-59.
148. Красногорская Н.В., Неизвестный А.И. Экспериментальное исследование эффективности столкновения и слияния заряженных капель равных размеров.// Изв. АН СССР. - Физика атмосферы и океана. – 1973. - Т.9. - №4. - С.399-410.

149. Котов Н.Ф., Смолина Т.И. Карты аномалий ливневой активности над территорией Ленинградской области. Тр. ГГО, Гидрометеиздат, вып.128, 1962, с.35-56.
150. Кудашкин Г.Д., Егоров В.В., Васильев С.Л. Методика и предварительные результаты натурных экспериментов по вызыванию осадков из конвективных облаков при воздействии кристаллизующими реагентами с самолета АН-2. //Тр.ГГО. – 1981. - Вып.439.-С. 74-83.
151. Кудашкин Г.Д. и др. Методические указания по проведению опытно-производственных работ по увеличению осадков из конвективных облаков. ГГО им. А.И.Воейкова. Л.: - 1987. – 41 с.
152. Кудашкин Г.Д., Зинченко А. В., Ильин С.Н. и др. Оценка результатов опытов о вызывании осадков из конвективных облаков при введении реагента в подоблачный слой.// Тр. ГГО. – 1988. – Вып. 517. – С. 3-9.
153. Кудашкин Г.Д., Зинченко А. В., Ильин С.Н., Клинго В.В., Окунев С. М. Оценка результатов опытов по вызыванию осадков из конвективных облаков при введении реагента в подоблачный слой.// Активные воздействия на гидрометеорологические процессы. – Труды Всесоюзной конференции. – 1990.- С. 260-265.
154. Кудашкин Г.Д., Ильин С.Н., Исекеев Е. А., Окунев С. М., Пряхин П. Н., Щедрина Л. Г. Технология применения самолета АН-2, оборудованного КУСАГ-П, для искусственного вызывания осадков из мощных кучевых облаков при борьбе с лесными пожарами // - Краснодар, НПО ПАНХ ГА МГА.- 1990.
155. Курилов Ю.М. Природа грозового электричества. [Электронный ресурс] URL: <http://yumkur.narod.ru/> (дата обращения 11.02.2011).
156. Кухлинг Х. Справочник по физике. Пер. с немецкого. М.: Мир. – 1982. – 520 с.
157. Левин Л.М. Электрическая коагуляция облачных капелек.// Тр. Эльбрусской высокогорной экспедиции.- 1961. – Т.2(5). – С. 5-42.

158. Левин Л.М. Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. - М.: Изд. АН СССР.- 1961.- 266с.
159. Левин Л.М., Седунов Ю.С. Гравитационная коагуляция заряженных облачных капель в турбулентной среде.// Труды ИПГ.-1967.- Вып.9. – С.3-16.
160. Леонов М. П., Перелет Г. И. Активные воздействия на облака в холодное полугодие. – Л.: Гидрометеиздат. 1967.-152с.
161. Лесной форум Гринпис. ПРЕСС- КОНФЕРЕНЦИЯ: Ущерб от лесных пожаров в России составил 375 млрд. долларов. 27.08.2010. [Электронный ресурс].URL: <http://www.forestforum.ru> (дата обращения 29.04.2011).
162. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака. Строение и физика образования.// Л.: Гидрометеиздат. - 1983.- 279 с.
163. Мазуркин П.М., Кудрявцева Л.А., Егорова К.А. Способ испытания лесных горючих материалов на воспламеняемость. Патент № 2416793 – 2009-14с.
- 164 Мазуров Г. И., Козлов В.Н., Акселевич В. И. Возможные перспективы создания искусственных облачных образований с целью нивелирования экстремальных температур (обзор).// Тр. ГГО. – 2011.- Вып. 564. – С. 251 – 267.
165. Мамучев И.М., Калов Х.М. Туманы и активное воздействие на них. – Нальчик: ООО «Полиграфсервис и Т», 2011. – 122 с.
166. Матвеев Л.Г. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984.- 640 с.
167. Маэно Н. Наука о льде. М.: "Мир", 1988, 229с.
168. Мейсон Б. Дж. Физика облаков.// Л.: Гидрометеиздат. - 1961.- 541 с.
169. Месси Г. Отрицательные ионы. // М.: Атомиздат. - 1979. – 754 с.
170. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика, ч.2. – М.: Наука, 1967. - 720с.
171. Мордовина Л. С. О зарядении облачных частиц.// Тр. ГГО. – 1969. – Вып. 242. – С. 94-103.

172. Морозов В. Куповых Г. Теория электрических явлений в атмосфере. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2012. – 329с.
173. Мучник В.М. Физика грозы. - Л.: Гидрометеиздат. - 1974. – 351 с.
174. Мучник В.М., Фишман Б.Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат. – 1982. - 206 с.
175. Невзоров А.Н. Самолетный измеритель влажности облаков. // Труды ЦАО.-1983.- Вып.147.- С. 19-26.
176. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М.-Л.: Гослесбумиздат. – 1949. – 75с.
177. Нестеров В.Г., Гриценко М. В., Шабунина Т.А. Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса// Метеорология и гидрология. – 1968. –№ 9 - С.102-104.
178. Никандров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы.// Л.: Гидрометеиздат. - 1959.- 191 с.
179. Никандров В.Я., Шишкин Н.С. Исследования по физике облаков. - Труды ГГО.- 1974. - Вып.344. - С.180-208.
180. Никандров В.Я., Свистов П.Ф., Бурчуладзе Н.Н., Туркин Ю. И. Химический состав и заряджение капель при фазовых переходах.// Тр. ГГО. – 1981. - Вып. 439. – С. 49-54.
181. Никандров В.Я. К вопросу о регулировании процессов электризации в конвективном облаке. // Тр. ГГО. – 1984 – Вып. 482. - С. 3-8.
182. Никитина Е.А. Вероятность возникновения лесных пожаров при различном характере барического поля // Тр. ЦИП. – М.-Л.: 1963. - Вып.124. – С. 40-47.
183. Никитюк В.А., Сумин Ю.П., Торопова Н. В., Шишкин Н.С. О Работы по тушению лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками на ЕТС в 1972г.// Тр. ГГО. – 1974. – Вып. 290. – С.94-102.
184. Облака и облачная атмосфера. Справочник под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат. – 1989. – 647с.

185. Осипова Г.И. Облачные ресурсы для активных воздействий в лесной зоне Европейской территории СССР за пожароопасный сезон.// Труды ГГО .- 1979. - Вып.420.- С.112-120.
186. Осипова Г.И. Возможность использования данных наземных наблюдений над облаками при определении числа дней для искусственных воздействий. // Тр. ГГО. - 1969. – Вып. 239. – С. 146-157.
187. Осипова Г.И., Прохорова Г.Н. Облачные ресурсы для активных воздействий в Архангельской области и Коми АССР в пожароопасный сезон.// Тр. ГГО. – 1975. – Вып. 356. – С. 92-102.
188. Осипова Г.И. Облачные ресурсы для искусственных воздействий в лесной зоне Урала.// Тр. ГГО. - 1981. – Вып. 439. – С. 109-116.
189. Осипова Г.И. Особенности территориального и временного распределения облачных ресурсов на северо-западе Европейской территории СССР.// Тр. ГГО. - 1979. - Вып. 439. – С.132-140.
190. Оренбургская Е. В. Исследование возможности тушения лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками на территории Хабаровского края.// Тр. ГГО. – 1977. - Вып. – 389. – С. 117-122..
191. Оренбургская Е. В., Сумин Ю.П. Исследование условий, благоприятных для воздействия в пожароопасных районах Забайкалья.// Тр. ГГО. - 1975. – Вып. – 356. – С. 74-80.
192. Оренбургская Е. В. К характеристике кучево-дождевых облаков в отдельных лесных районах Восточной Сибири.// Тр. ГГО. – 1975. – Вып. 356. - С. 81-91.
193. Оренбургская Е. В. К оценке условий, благоприятных для проведения воздействий в пожароопасных районах Приморского края.// Тр. ГГО. - 1979. - Вып. 405. - С.116-121.
194. Оренбургская Е. В. К характеристике условий, благоприятных для воздействия в пожароопасных районах Сахалина.// Тр. ГГО. - 1981. – Вып. 439. – С. 117-122.

195. Оренбургская Е. В., Замиралова В.Ф. К исследованию условий, благоприятных для тушения лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками на территории Западной Сибири. // Тр. ГГО. - 1982. – Вып. 457. – С. 84-89.
196. Плауде Н.О., Соловьев А.Д. Льдообразующие аэрозоли для воздействия на облака. // ВНИИГМИ-МЦД, Обзор, Обнинск.- 1979. - 82 с.
197. Половина И.П. Воздействия на внутримассовые слоистообразные облака. Л.: Гидрометеиздат.- 1971.- 216 с.
198. Прейс И. Р. К вопросу о конденсационных процессах при отрицательных температурах.// Тез. Докл. Всес. конф.- Нальчик, 22-25 окт. 1991г.- Нальчик. – 1991.- С. 114-115.
199. Прихотько Г.Ф. Искусственные осадки из конвективных облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1968.- 176с.
200. Райст П. Аэрозоли. М.: Мир. – 1987. – 278с.
201. Распознавание и прогнозирование лесных пожаров на базе ГИС-технологий. 2006г. [Электронный ресурс] URL:[http:// www.topreferats.ru](http://www.topreferats.ru) (дата обращения 10.03.2011).
202. Романов Н.П. ,Дрофа А.С., Ким Н.С., Савченко А.В. Об использовании слаборастворимых гигроскопических веществ для воздействия на теплые облака и туманы.// Изв. РАН, ФАО. - 2006. - Т.42. - №1. - С. 80-91.
203. Савченко А.В., Смирнов В.В. Современные методы искусственной ионизации облачной среды.// Труды ИЭМ. – 1976. – Вып. 14(59). – С. 3-20.
204. Седунов Ю.С. Исследования по физике облаков и активному воздействию в США. Труды ИЭМ, 1970, вып.19, с.3-26.
205. Седунов Ю.С. Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере.// Гидрометеиздат. - Л.: 1972. - 195 с.
206. Синюков В. В. Вода известная и неизвестная. М.: Знание. – 1987. – 175с.
207. Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Волков Н.,Н., Довгалюк Ю. А., Понамарев Ю.Ф., Степаненко В.Д. Экспериментальные исследования

пространственно-временной неоднородности строения конвективных облаков.// Метеорология и Гидрология. – 2005. - № 6. - С.38-50.

208. Синькевич А. А.. Конвективные облака северо-запада России.- Гидрометеиздат. СПб: 2001.-106с.

209. Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Степаненко В.Д., Веремей Н. Е., Волков Н.Н., Куров А. Б., Пивоварова Л.В. Некоторые аспекты исследования конвективных облаков и осадков.// Тр. ГГО.- 2009.- Вып. 560.- С.168-188.

210. Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Степаненко В.Д. Лабораторное моделирование коронного разряда в облаках.- СПб.-Астерон. – 2005. – 62с.

211. Смирнов В.В. Перестройка микроструктуры туманов под воздействием гигроскопических частиц. – Труды ИЭМ. – 1980. - Вып.25(95). - С.3-9.

212. Смирнов В.В. О воздействии на облака с помощью заряженных частиц.// Тр. ИЭМ.- 1972. – Вып.2(36). - С 3-32.

213. Смирнов В.И., Сергеев Б.Н. Распределение по размерам крупных облачных капель, выросших на гигроскопических ядрах конденсации. – Изв. АН СССР.- ФАО. – 1973.- Т.9.-№12.- С. 1290-1303.

214. Сороковик В.М. Опыт тушения лесных пожаров искусственно вызванными осадками на территории Красноярского края.// Тр. ГГО. – 1972. – Вып. 278. – С.101-105.

215. Сосникова Е. В. К вопросу о природе активных частиц в пиротехнических аэрозолях.// Тр. ЦАО. – 1988.- № 171. – С. 25-29.

216. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. – М.: Мир. – 1971. - 533с.

217 Софронов М. А., Волокитина А.В. Ежедневная вероятная плотность действующих пожаров как абсолютный критерий пожарной опасности в лесах. – Лесное хозяйство. – 2007.- № 1.- с 41-43.

218. Сталевич Д.Д. Об оптимальных условиях воздействия на капельные облака с помощью гигроскопических веществ. //Тр . ГГО. – 1961. - Вып.117. - С.10-25.

219. Сталевич Д.Д., Учеветкина Т.С. Об оптимальных расходах льдообразующих реагентов при воздействии на облака с целью вызывания из них осадков. // Тр. ГГО. – 1967. – Вып. 202. – С. 13-21.
220. Сталевич Д.Д., Учеветкина Т.С. К вопросу об оптимальных расходах льдообразующих реагентов при воздействии на облака с целью вызывания из них осадков.// Тр. ГГО. - 1968. – Вып. 224.- С. 10-17.
221. Сталевич Д. Д. Вызывание искусственных осадков с помощью гигроскопических веществ. - Труды ГГО. – 1972. - Вып. 278.- С 3-18.
222. Сталевич Д.Д., Учеветкина Т.С. К вопросу о выборе дозировок льдообразующих реагентов.// Тр. ГГО. – 1974. - Вып.290. - С. 75 - 80.
223. Сталевич Д.Д., Учеветкина Т.С. Теоретическое исследование процесса искусственного осадкообразования применительно к задаче тушения лесных пожаров.// Тр. ГГО. – 1974. - Вып.290. - С. 81-93.
224. Сталевич Д.Д., Учеветкина Т.С. Численное моделирование процесса искусственного осадкообразования применительно к задаче воздействия конвективные облака с самолета Ан-2.// Тр. ГГО. -1986.- Вып.497. – С. 3-11.
225. Станкова Е.Н. О влиянии задерживающих слоев на развитие конвективных облаков.// Тр. ГГО.- 1986.- Вып. 497.- С. 12-19.
226. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 343с.
227. Степаненко В.Д., Панин Б. Д., Гурвич А. С., Козлов В.Н., Матвеев Л. Т. Некоторые результаты радиотеплолокационных измерений на ИСЗ «Космос-243».// Тр. ГГО.- 1976.- Вып. 363. – С. 91-97.
228. Степаненко В.Д. Довгалюк Ю.А., Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Понамарев Ю.Ф., Першина Т.А. Исследование влияния электрических разрядов на фазовые и микроструктурные преобразования воды в облаках. Метеорология и гидрология. – 2002. - №3. – С. 39-50.
229. Степаненко В.Д., Довгалюк Ю.А., Оренбургская Е.В. и др. К использованию данных радиолокационных наблюдений для оценки

- облачных ресурсов (на примере района Ленинграда. Сб. Радиолокац. метеорол.: Матер. метод. центра по радиолокац. метеорол. соц. стран. – Л.: Гидрометеиздат. 1987. – С. 121-129
230. Стожков Ю.И., Покревский П.Е., Зулло Ж. мл. и др. Воздействие потоков заряженных частиц на интенсивность осадков.// Ж. Геомагнетизм и аэрономия. 1996.–Т.36.- № 4.- С 211-216.
231. Сумин Ю.П. Об опытах по тушению (локализации) лесных пожаров путем искусственного воздействия на облака.// Тр. ГГО. – 1971. - Вып.262. – С. 54-69.
232. Сумин Ю.П., Шварц Я.М. Электрическое поле в окрестности конвективных облаков.// Тр. ГГО. – 1971. - Вып.262. – С. 113-132.
233. Тверская Н.П. Опытное изучение соударения и слияния заряженных капель.// Тр. ГГО. – 1958. - Вып.73. – С. 123-131.
234. Томилин К.А. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. М.: Физматлит. - 2006. - 368 с.
235. Трушков Ю.Ю.и др. Сравнительный анализ данных современной науки о природе воды./ Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение// 2010. - № 4. Том 12. - Стр. 160-174.
236. Филиппов А.Х. Грозы Восточной Сибири. Л.: Гидрометеиздат. 1974. – 76с.
237. Фольмер М. Кинетика образования новой фазы. Пер. с немецкого. – М.: Наука. 1986.- 205с.
238. Фоменко В.С., Подчерняева И.А. Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов. Справочник. – М.: Атомиздат. - 1975.- 320с.
239. ФорсункиTurbotak [Электронный ресурс] URL:<http://www.turbosonic.com/products/nozzles/turbotak> (дата обращения 19.03.2011).
240. Фрелих Г. Теория диэлектриков.// М.: ИЛ.- 1960. – 249 с.

241. Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества. — Л - М.: ГИТТЛ. 1949 — 155 с.
242. Химач М. А., Шишкин Н. С. Осадки из чисто водяных облаков в районе Ленинграда. // Труды ГГО.-1954.-Вып. 47(109).-С.53-56.
243. Хоббс П.В Научные основы, методы и результаты активных воздействий на облака. В книге - Изменение погоды человеком.// М.: Изд. Прогресс. — 1972- С.48-63.
244. Чукбар К.В. Лекции по явлениям переноса в плазме. Долгопрудный. — Изд. Дом. «Интеллект». — 2008. — 257с.
245. Чукин В,В. Физические свойства атмосферы. — СПб.: Система. — 2005. — 112с.
246. Шишкин Н.С. Расчет интенсивности осадков из водяных облаков. — Тр. ГГО. 1948.- Вып. 13(75).- С. 77-88.
247. Шишкин Н. С. ,Кудашкин Г.Д. Результаты и перспективы дальнейших исследований по вызыванию локальных осадков с целью тушения лесных пожаров.// В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной конференции по физике облаков и активным воздействиям на них. - Обнинск. — 1979. — С.56-58.
248. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозовое электричество. — Л.: Гидрометеиздат. 1964. — 402 с.
249. Шишкин Н. С. Исследование заряжения капель в облаках и туманах. // Тр. ГГО. — 1968. — Вып. 224. — С. 78-86.
250. Шишкин Н.С., Довгалюк Ю.А., Дьяченко Ю.Д. Тушение лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками. / WMO Weather Modification Programme: Proc. 3-rd Sci.Conf. on Weather Modif., Clermont-Ferrand, 1980, vol.1, p.301-304.
251. Шметер С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. - Л.: Гидрометеиздат. - 1987.-287с.
252. Щетинский Е.А. Тушение лесных пожаров: Пособие для лесных пожарных. — М.: ВНИИЦлесресурс. - 1996 — 80 с.

253. Щукин Г.Г., **Козлов В.Н.**, Степаненко В.Д., Гальперин С.М., Стасенко В.Н. Активные воздействия на облачные системы с целью обеспечения благоприятных погодных условий в период празднования 300-летия Санкт-Петербурга 30-31 мая 2003 г// Тр. НИЦ ДЗА (Филиал ГГО). - 2004. -Вып.5 (553). - С.143-168
254. Щукин Г.Г., Степаненко В.Д., Снегуров А.В. Перспективные направления радиолокационных наблюдений за атмосферой. - Тр . ГГО.- 2010. - Вып.561. - С. 223-241
255. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л.: Гидрометеиздат 1975.- 279 с.
256. Экономические последствия «жаркого лета-2010» [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.rian.ru](http://www.rian.ru) (дата обращения 20.02.2011).
257. Эмото Масару. Послание воды. Минск.: Изд. «Попурри». – 2006.
258. 231. Якубович Н.В. Все самолеты Г.М. Бериева - М.: «Астраль», АСТ,2002.-С. 102-108.
259. Aerosols Handbook, Measurement, Dosimetry and Health effects», Ed. Ruser L.S. and Harley N. H., CRC Press, Taylor&Francis group, London- New York, 2012.
260. Aircraft instrumentation for cloud physics research and weanher modification programmes // WMO, 1977.- Report №7.- 77 p.
261. Bigg E.K. An independent evaluation of a South African hygroscopic cloud seeding experiment 1991-1995. // Atmos. Res.-1997.-Vol. 43.- P/ 111-127.
262. Bowen E. G. A new method of stimulating convective clouds to produce rain and hail.// Quart. J. Roy. Met. Soc.- 1952.- P.37.
263. Brintjes R. T., Breed D.W., Salazar V und and. Overview and results from Mexican hygroscopic seeding experiment. // Preprints 15 Conf. On Planned and Inadvertent Weather Modification.- 2001. P. 45-48.

264. Chernikov A.A. Physics of Clouds and Precipitation. // National Report (1999-2002) of the National Geophysical Committee, Russian Academy of Sciences, presented to the XXIII Gen. Ass. of the Int. Union of Geodesy and Geophysics, Moscow - 2003. - Iss.7, № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wdcb.ru/NGC/NRIAMAS03.html> (data obraschenija: 07.03.2011).
265. Fletcher N. H. The Chemical. Physics of Ice. Cambridge. – 1970. – 271p.
266. Klingo V.V., Kozlov V.N., Stasenko V.N., Shchukin G.G. Atmospheric Resources Control by the Use of Ionogeneous Hygroscopic Reagent. Seventh WMO Scientific Conference of Weather Modification. Thailand, 1999, v.2, p.301-302.
267. Klingo V.V. Influence of Adsorbed Atomic and Molecular Ions Electric Fields on Ice Phase Formation in Clouds. Proceeding of the 14 International Conference on Nucleation and Atmospheric Aerosols. Helsinki, 1996, p.322-325.
268. Klingo V.V. Atomic and Molecular Ions of Natural Atmosphere as Electric Systems. Proceeding of the 15 International Conference on Nucleation and Atmospheric Aerosols. Rolla Missouri, USA, 2000.
269. Kozlov V.N., Lihachev A.V., Okunev S.M., Stasenko V.N., Shcherbakov A.P. Shchukin G.G Cloud modification for causing precipitation on forest fires WMO Report No 39, 2003, pp.153-155.
270. Krause T.W. Bruinjes R. T., Verlinde J. Microphysical and adar observations of seeded and nonseeded continental cumulus clouds. // J. Clim. Meteorol. – 1987. – Vol. 26. № 5. – P. 585-606.
271. Langmuir I. The Studies of the effects produced by dry ice seeding of stratus clouds.// Final Report Projec Cirrus.- Gen. Electr. Res. Lab.-1948. – 135p.
272. Mather G.K., Terblanche D.E., Steffens F.E., Fletcher L. Results of the South African cloud -seeding experiments using hygroscopic flares.// J. Appl. Met.- 1997.- V. 36- P. 1433-1447.
273. Murty A.S.R .An overview of warm cloud modification research in India.// Prc. Fifth WMO Scientific Conf. – Beijing, China, 1989. – P.521-524.

274. NASA [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.jpl.nasa.gov/news/](http://www.jpl.nasa.gov/news/)(дата обращения 03.02.2011).
275. Neiburger, M., Chen C. W., Computations of the growth of cloud drops by condensation using an electronic digital computer. // *Physics of Precipitation, Geophys. Monogr., Amer. Geophys. Union, 1960, No. 5, 191–209.*
276. Orville H. D. A review of cloud modeling in weather modification.// *Bull. Amer. Meteor. Soc.- 1996. – V. 77. - № 7. – P. 1535 – 1555.*
277. Pruppacher H.R., Klett J.D. *Microphysics of cloud and precipitation. – D.Reidel Publish.Co., 1978, 714 p.*
278. Petrov V.V., Egorov O.G., Melnik A.M., Zakharov F.M., Skuratov S. N. Data transmission system «Land-Aircraft-Land». Ninth WMO Sci. Conf. on Weather Mod.- Turkey, 2007.
279. Rozenfeld D., Axisa D., Woodley W. L., Lahav R. A Quest for Effective Hygroscopic Cloud Seeding.// *J. Appl. Met – 2010. – V.49. - № 7. – P. 1548-1562.*
280. Schlamp K.J., Crover S.N. and Pruppacher H.R.(1976). A Numerical Investigation of the Effect of Electric charges and Vertical External Electric Fields on the collision Efficiency of cloud Drops. *J. Atmos. Sci. -v.33- No9- P.1747-1755.*
281. Segal Y., Khain A., Pinsky M., Rosenfeld D. Effect of hygroscopic seeding on rain drop formation as seen from simulations using a 2000-bin spectral cloud parcel model.// *Atm. Res.- 2004.- V. 72. P. 3-34.*
282. Silverman B. A., Sukarnyanaset W. Results of the Thailand warm-cloud hygroscopic particle seeding experiment. // *J. Appl. Meteorol. – 2000. – Vol. 39. – P. 1160-1175.*
283. Silverman B. A. A critical assessment of hygroscopic seeding of convective clouds for rainfall enhancement. // *Bull. Amer. Meteor. Soc.- 2003. - Vol. 84 - P. 1219-1230.*

284. Terblanche D. E., Steffens F. E., Fletcher L., Mittermaier M.P., Parsons R. Toward the operational application of hygroscopic flares for rainfall enhancement in South Africa. // J. Appl. Meteorol. – 2000. – V.39. - № 11.- P. 1811-1821.
285. Yang, Y., Levin Z., Reisin T. G., Tzivion S. A Numerical Evaluation of Seeding with Hygroscopic Flares: Sensitivity to Seeding Time, Seeding Height, Seeding Amounts, Size of Particles and Environmental Shear. // Proc. Seventh WMO Science Conf. On Weather Modification. - Chiang Mai, Thailand, 1999, - P. 69-72.
286. Woodley W. L., Rosenfeld D., Silverman B. A. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part I: The demonstration experiment. // J. Appl. Meteorol. – 2003. –Vol. - № 7. –P.920-938.
287. Woodley W. L., Rosenfeld D., Silverman B. A. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part I: Exploratory analysis. // J. Appl. Meteorol. – 2003. –Vol. - № 7. –P.939-951.
288. [Электронный ресурс] URL:[http:// www.rg.ru/2010/08/26pojar-anons.html](http://www.rg.ru/2010/08/26pojar-anons.html) (дата обращения 18.03.2011).
289. [Электронный ресурс] URL:[http:// www.td-analitpribor.ru](http://www.td-analitpribor.ru) (дата обращения 10.05.2010).

Приложение

2000 год

№ № п/п	Наименование авиабаз	Количество воздействий (включая профилактику)	Наименование пиропатронов	Использовано пиропатронов (шт.)	Результаты		
					Кол-во пожаров, на которые попали осадки, га		Кол-во воздействий, когда осадки не были вызваны
					всего, пожаров/ га	из них оказали тушение / га	
1	Амурская	5	ПВ-26	14	5/80	4/30	1
2	Забайкальская	8	ПВ-26 ФХС	39	7/40	6/35	1
3	Иркутская	10	ПВ-26 ФХС	10	2/19	2/19	0
4	Красноярская	4	ПВ-26 ФХС	10	1/26	1/26	0
5	Сыктыв-рская	61	ПВ-26	205	10/14623	5/14503	34
6	Томская	15	ПВ-26 ФХС	30	4/205	4/205	0
7	Тюменская	1	ПВ-26 ФХС	2	0/0	0/0	1
8	Ханты- Мансийская	6	ПВ-26 ФХС	12	6/376	6/376	0
9	Читинская	26	ПВ-26 ФХС	30	19/3897	6/1348	17
10	Читинская	61	ПВ-26	78	45/3574	14/1427	5
11	Якутская	13	ПВ-26 ФХС	29	5/1795	1/170	2
	ИТОГО:	210		459	104/24635	49/18139	61
	в том числе	127	ПВ-26	297	60/18277	23/15960	40
		83	ПВ-26 ФХС	162	44/6358	26/2179	21

2001 год

№№ п/п	Наименование авиабаз	Ко-во АВ (включая профилактические)	Наименование пиропатронов	Испол- зовано пиро- патро- нов (шт.)	Результаты		
					Кол-во пожаров, на которые попали осадки		Кол-во воздей- ствий без осадко в
					Всего пожаров/ га	из них оказали тушение/ га	
1	Дальневосточная	1	ПВ-26 ФХС	16	1/500	1/500	0
2	Западно- Сибирская	2	ПВ-26 ФХС	11	2/340	1/240	1
3	Красноярская	11	ПВ-26 ФХС	52	4/2213	3/130	3
4	Сыктывкарская	35	ПВ-26 ФХС	70	8/380	2/70	4
5	Уральская	10	ПВ-26 ФХС	10	1/5	1/5	8
	ИТОГО:	59	ПВ-26 ФХС	159	16/3438	8/450	16

2002 год

В 2002 г. искусственные осадки были вызваны на лесные пожары в ряде регионов РФ (Якутия, Тува, Ямало-Ненецкий автономный округ и др.).

№№ п/п	Наименование авиабаз	Кол-во воздействи й (включая профилак- тические)	Наименован ие пиропатрон ов	Исп. пиро- патро- нов (шт.)	Результаты		
					Кол-во пожаров, на которые попали осадки		Кол-во воздей- ствий без осадко в
					всего, пожаров/ га	из них оказали тушение/ га	
1	Уральская	4	ПВ-26 ФХС	4			3
2	Западно- Сибирская	2	ПВ-26 ФХС	8			2
3	Красноярская	9	ПВ-26 ФХС	95	3/3500	3/3500	2
4	Иркутская	12	ПВ-26 ФХС	12	3/20	3/20	0
5	Забайкальская	5	ПВ-26 ФХС	18			0
6	Читинская	42	ПВ-26 ФХС	42	18/13450	10/1300	19
7	Якутская	35	ПВ-26 ФХС	280	12/230	4/950	5
8	Дальневосточн ая	2	ПВ-26 50-04-11	20	2/3050	1/800	1
	ИТОГО:	111		479	38/20250	21/5715	32

2003 год

В течение пожароопасного сезона 2003 г. было произведено 176 воздействий, в 139 случаях были вызваны осадки. На 112 пожарах зарегистрировано выпадение дождя и на 71 пожаре он оказал существенное влияние для тушения. В среднем на одно воздействие израсходовано 4 пиропатрона.

№ п/п	Наименов. авиабаз	Кол-во воздейств ий (включая профилак тические)	Наимен. пиропат ронов	Используй. пиропатро нов, шт.	Результаты		
					Кол-во пожаров, на которые попали осадки		Кол-во воздействи й без осадков
					Всего пожаров/ площадь, га	Оказали тушение / га	
1	Северо- Западная	9	ПВ-26 ФХС	50	9/118	4/58	5

2	Уральская	10	ПВ-26 ФХС	10			8
3	Западно- Сибирская	2	ПВ-26 ФХС	10			2
4	Красноярская	33	ПВ-26 ФХС	132	21/18350	12/10170	12
5	Томская:	1	ПВ-26 ФХС	8	1/878	1/878	12
6	Иркутская	11	ПВ-26 ФХС	13	4/12	3/11	
7	Забайкальска я	10	ПВ- 26 ФХС	43	5/309	5/309	
3	Читинская	87	ПВ-26 ФХС	374	70/128700	44 /62700	7
9	Якутская	10	ПВ-26 ФХС	4	1/180	1/180 1	1
10	Дальневосточ -ная	3	ПВ-26 ФХС	48	1/190	1/190	2
	Итого за 2003 г.	176	•	692	112/ 148737	71/ 74496	37

2004 год

№ п/п	Наименование авиабаз	Кол-во воздействи й (включая профилакти ческие)	Наимено вание пиропатр онов	Использовано пиропатронов , шт.	Результаты		Кол-во возд- ствий без осадков
					Кол-во пожаров, на которые попали осадки	Кол-во возд- ствий без осадков	
					Всего пожаров/ площадь, га	Из них оказали тушение/ площадь, га	
1	Северная	3	ПВ-26 ФХС	16	2/1040	2/1040	0
2	Уральская	15	ПВ-26 ФХС	15	0	0	2
3	Ханты- Мансийская	23	ПВ-26 ФХС	49	7/5510	4/5329	0
4	Красноярская	21	ПВ-26 ФХС	99	9/ 7/13750	7/7010	0
	ИТОГО:	62		179	18/20300	13/13379	2

2005 год

В течение пожароопасного сезона 2005 г. проводились работы по искусственному вызыванию осадков для тушения лесных пожаров в следующих регионах:

1) Красноярский край – проведены воздействия на 14 лесных пожаров. Осадки были вызваны и оказали положительные результаты на тушение 9 пожаров площадью 2215 га. В 5 случаях осадки не были вызваны. Расход пиропатронов – 84 шт.

2) Республика Саха (Якутия) – проведены воздействия на 2 лесных пожара. Результат – вызваны незначительные осадки, которые существенного влияния на тушение не оказали.

Небольшие объемы проведенных на 2005 г. работ по АВ можно объяснить сравнительно невысокой горимостью лесов, а также погодными условиями в периоды действия лесных пожаров (отсутствие конвективной облачности).

2006 год

Искусственное вызывание осадков для тушения лесных пожаров в течение пожароопасного сезона 2006 г. проводилось в следующих регионах:

1) Красноярский край – проведено 98 воздействий на 32 лесных пожара на общей площади 25,4 тыс.га. Осадки были вызваны и оказали положительные результаты на тушение 20 пожаров площадью 19,03 тыс.га. В 9 случаях осадки не были вызваны. Всего израсходовано 286 аэрозольных генераторов.

2) Иркутская область – проведено 40 воздействий на 10 лесных пожаров. Использовано 80 самолетных аэрозольных генераторов. Во всех случаях были вызваны осадки, которые оказали существенное влияние на тушение. На отдельных пожарах было зафиксировано выпадение града (Усть-Кутский р-н, 29 июля, лесной пожар № 26).

Акт внедрения



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА
(РОСЛЕСХОЗ)

**Федеральное государственное
учреждение Центральная база
авиационной охраны лесов
«Авиалесоохрана»**

Адрес: 141200, г. Пушкино, Московской области,
ул. Горького, 20
Тел.: (495) 993-4138 Факс: (495) 626-9931
Телекс 64611707 AVIA RU
E-mail: aviales@aviales.ru

03.12.2008 № 2-07

На № _____

Г

АКТ

о внедрении руководящего документа РД 52.04.674-2006
«Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны
лесов от пожаров» в авиабазах Урала и Западной Сибири
в 2008 г.

Настоящий акт подтверждает, что в первом полугодии 2008 года
«Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от
пожаров» РД 52.04.674-2006 было внедрено в авиабазах: Уральская,
Тюменская, Томская, Новосибирская, Ханты-Мансийская и Алтайская.

Начальник

лётно-производственной службы



В.Л. Сементин

Заключение о результатах испытания реагента



Утверждаю

Зам. директора ИЭМ НПО "Тайфун"

В.Н. Иванов

15 " марта 2001 г.

Заключение

о результатах испытаний ноногенных гигроскопических реагентов, разработанных НИЦ ДЗА.

В марте - апреле 2000 г. в большой аэрозольной камере (БАК) НПО "Тайфун" проведены испытания эффективности использования генерируемых пиротехническим способом ноногенных гигроскопических реагентов для воздействия на облачную среду с целью искусственного увеличения осадков. Эффективность воздействия оценивалась по изменениям микроструктуры облачной среды при вводе в нее гигроскопического реагента по сравнению с микроструктурой облачной среды, реализующейся в БАК без ввода реагента. Образование облачной среды в БАК осуществлялось путем адиабатического расширения воздуха при эквивалентной вертикальной скорости подъема воздушной массы 1-2 м/сек, характерной для конвективных облаков. При температуре воздуха в БАК около 15-20°C в экспериментах реализовалась облачная среда с водностью 1-1,5 г/м³. Гигроскопический реагент вводился в БАК пиротехническим способом перед началом образования облачной среды, что, применительно к натурным условиям атмосферы, моделирует введение реагента в подоблачный слой (в основание облака).

Всего было испытано 5 образцов из представленных пиросоставов (образцы N1, N2, N5, N7, N14). В экспериментах сжигалось 0,5-0,7 г испытываемого пиросостава (массовая концентрация продуктов горения пиросостава составляла 160-220 мкг/м³).

Результаты экспериментов показали, что при вводе в БАК пиросоставов N1, N2, N5 и N7 происходит перестройка микроструктуры облачной среды по сравнению с облачной средой без введения реагента. При этом реализуется меньшая концентрация облачных капель и большие их размеры. Так, если в фоновом эксперименте концентрация капель составляла $N = 1700 \text{ см}^{-3}$, а среднекубический радиус капель $r = 5,8 \text{ мкм}$, то при вводе вышеуказанных пиросоставов $N = 1100 \text{ см}^{-3}$, $r = 6,7 \text{ мкм}$. При этом распределения капель по размерам уширяются – в фоновом эксперименте относительная дисперсия спектра капель по размерам $D = 0,3$, а при вводе реагентов $D = 0,4-0,6$.

В эксперименте с пиросоставом N14 существенных отличий в микроструктуре облачной среды по сравнению с фоновым экспериментом не обнаружено.

На основании полученных результатов можно сделать заключение о возможности модификации микроструктуры облачной среды с помощью предложенных реагентов – укрупнения облачных капель и уширения их спектра размеров. Оба этих процесса приводят к ускорению процессов коагуляции в облаках и стимулированию осадкообразования, однако для оценки возможности использования указанных реагентов с целью искусственного увеличения осадков из конвективных облаков необходимо проведение дополнительных исследований.

Зав. лабораторией "Облачные ресурсы и метеорологическое обеспечение работ"

НПО "Тайфун", д.ф.-м.н

А.С. Дрофа

14.03.00