

На правах рукописи

Козлов Владимир Николаевич

УДК 551.509.6:543.541

Электрические методы искусственного регулирования осадков

Специальность: 25.00.30-Метеорология, климатология и агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»)

Научный консультант: доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики облаков и атмосферного электричества ФГБУ «ГГО», Санкт-Петербург

Морозов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, заместитель директора по геоэкологии Федерального государственного унитарного научно-производственного предприятия «Севморгео», Санкт-Петербург

Корнеев Олег Юрьевич

доктор физико-математических наук, профессор, декан факультета «Естественно-научный и гуманитарный» Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону

Куповых Геннадий Владимирович

доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт прикладной геофизики им. Академика Е. К. Федорова», Москва

Тертышников Александр Васильевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Защита состоится «_26_» марта 2014 г. в _14_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 327.005.01 при ФГБУ «ГГО» по адресу: 124021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «ГГО»

Автореферат разослан « 26 » _____ 12 _____ 2013 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций,

доктор географических наук



А. В. Мещерская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования обусловлена назревшей в современном гидрометеорологическом обеспечении народного хозяйства 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 опасных явлений, приводящих к аномальным атмосферным процессам: засухам, наводнениям, сильным ливневым осадкам, грозам 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 имеет актуальное значение для народного хозяйства.

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 (КПО) 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. 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.

Актуальность проведенного исследования 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.

Однако в достигнутых за последние десятилетия результатах исследований 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 находит твердая углекислота (СО₂), йодистое серебро (AgI), гигроскопические вещества и грубодисперсные порошки. Применение этих реагентов в засушливый период года не всегда приводит к ИВО. Многие вопросы физики облаков и осадков остаются мало изученными. В результате не нашли применения в производственных процессах электрические методы воздействия на облака и осадки, требуется разработка реагентов без температурного порога применения, особенно в теплый период года, когда конвективные облака располагаются в области положительных температур в атмосфере.

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 интенсивности засух, КПО и тушения лесных пожаров наземными и авиационными средствами. 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.
- 6) 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, проведенные 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, А.П. Щербаков 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, осадкообразующий механизм и электричество облаков.

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

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.

Впервые дано определение электрической неустойчивости гидрометеоров в облаках.

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, ИЛ-76 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. Потенциальный экономический эффект от применения в ФГУ «Авиалесоохрана» разработанного в диссертационном исследовании реагента за 2000-2006гг. оценивается свыше 3,3 млрд. долларов США.

Результаты исследования внедрены в оперативно-производственные работы по охране лесов от пожаров в виде нормативных руководящих документов:

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;

РД 52.04.674-2006. Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от пожаров;

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, Приволжском, 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 легкомоторных и средневысотных воздушных судов.

4. Разработанный термоионизационный метод предотвращения молниевых разрядов заряженным аэрозолем.

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 грозových разрядов при охране лесов от пожаров. Показана возможность и целесообразность использования результатов работ по созданию технических средств и руководящих документов, опубликованных в Гидрометеоздате, 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; заявка на патент № 2013107400);

- 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 28-30 октября 1997г.- 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.

Публикации

Все авторские исследования, включенные в диссертацию, опубликованы в научной печати и составляют – 60 работ. По основным результатам диссертации опубликованы: 2 монографии (ISBN: 978-594652-359-2-2011; 978-3-659-46160-6-2013); получены 10 патентов РФ на изобретения и поданы 2 заявки на патенты РФ; 7 статей в трудах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК; 39 публикаций статей, тезисов и докладов в других изданиях.

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.

Содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность исследований по теме диссертации, сформулирована цель работы и вытекающая из нее необходимость решения ряда задач, которые способствуют достижению положительного эффекта АВ. Здесь же перечисляются основные проблемы и задачи АВ с целью ИРО, приводится научная и практическая значимость проведенных работ, формулируются основные положения, выносимые на защиту, отмечается личный вклад автора в полученных результатах, дается информация о публикациях работы, запатентованной интеллектуальной собственности, разработанных руководящих документах и докладах на научных конференциях и симпозиумах.

В **Главе 1 «Лесные пожары и борьба с ними»** 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 приводящим к ряду чрезвычайных ситуаций, связанных не только с уничтожением лесов, но и гибелью флоры и фауны. При лесоторфяных 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 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 АВ 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. 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.

Предложен новый физически обоснованный индекс оценки пожарной опасности лесов, учитывающий суточные изменения температуры и относительной влажности по установленным восьми срочным наблюдениям метеовеличин.

В Главе 2 «Физические основы искусственного вызывания осадков водным аэрозолем» 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 верхней границы 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 (В.А. Зайцев, Н.С. Шишкин, С.М. Шметер и др.), 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 g_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.

В Главе 3 «Искусственное вызывание осадков водными растворами заряженных гигроскопических веществ» приводится обоснование применения растворов гигроскопических реагентов, в том числе 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 дорастают 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 ($R \sim 5$ мкм) поднимаются до больших высот и, опускаясь, проделывают более длинный путь. Поэтому при выпадении из облака они достигают большего размера, чем частицы с первоначально большим радиусом.

При больших скоростях восходящего потока (8 м/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 $R_0 = 5$ 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 1 кг, конечный размер капли, выпадающей из облака при этом, составляет 0,85 мм. 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 12-18 мин 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 3 с 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. Взаимодействие этой концентрации отрицательных ионов с естественной системой облачных капель с радиусами до 10 мкм, приводит к гравитационной коагуляции капель до размера осадков. Для определения интенсивности осадков, их продолжительности и общего количества требуются отдельные исследования.

В Главе 4 «Обоснование электрических методов искусственного регулирования осадков» приведено обоснование электрических методов воздействия на процессы облако и осадкообразования. В этой связи является очень важным определить энергию неустойчивости электрического происхождения. 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.

С нашей точки зрения, проявление энергии неустойчивости электрического происхождения целесообразно разделить на два взаимообусловленных вида: микроэлектрическую неустойчивость и макроэлектрическую неустойчивость. Энергия неустойчивости первого вида (микроэлектрическая неустойчивость) проявляется при достижении предела Релея. В то время, как энергия неустойчивости второго вида (макроэлектрическая неустойчивость) проявляется в молниевых разрядах при накоплении критической величины 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. Соответственно, могут быть установлены критерии для выражения энергии неустойчивости электрического происхождения как предел Релея для капель и предельное количество электричества при грозových разрядах.

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 (1 г/м^3 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. 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. 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.

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.

Из такого приравнивания при поверхностном натяжении $75,7$ дин/см, $T = 0^\circ\text{C}$ находим

предельный заряд капли (табл.1):

Таблица. 1

Предельный заряд капли в электронах

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

Расчеты столкновений заряженных аэрозольных частиц с облачными каплями, а, следовательно, и их рост, связанный с электрической коагуляцией, проведены по формуле

$$N(r_1, q_1; r_2, q_2) = E(r_1, q_1; r_2, q_2) K_t n_1(r_1, q_1) n_2(r_2, q_2) \tau, \quad (1)$$

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

Приведенная формула 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).

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.

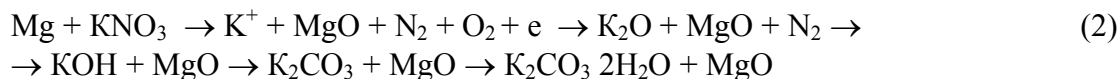
Из рассчитанного с весовым множителем истинного значения числа столкновений N при известной концентрации данного вида положительных капель находилось отношение числа столкновений к концентрации положительных капель. Другими словами, количество отрицательных капель, попавших на одну положительную каплю. 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.

В нашу задачу входило только показать, что искусственные заряженные капли, образовавшиеся с участием заряженных аэрозольных частиц, достигают даже в отрыве от неминусевого их взаимодействия с каплями естественной облачной среды размеров, которые соответствуют гравитационной коагуляции и выпадению осадков.

В Главе 5 «Термоионизационный метод генерации заряженных аэрозольных частиц» 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 $0,00075-0,75\text{ мкм}$ эмитирующие электроны при охлаждении до температуры $700-800\text{K}$.

Схематично происходящие реакции при горении ПС в атмосфере можно представить следующим образом:



Все приведенные выше химические процессы (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 $3000 - 4000\text{ K}$ приводит к образованию твердых аэрозольных частиц, которые представляют собой различные соли и окислы. Результаты испытаний ПС в камере туманов приведены на рис.1. Твердые частицы аэрозоля, образовавшиеся в результате горения ПС, имеют размеры в диаметре от $0,0075$ до $0,75\text{ мкм}$.

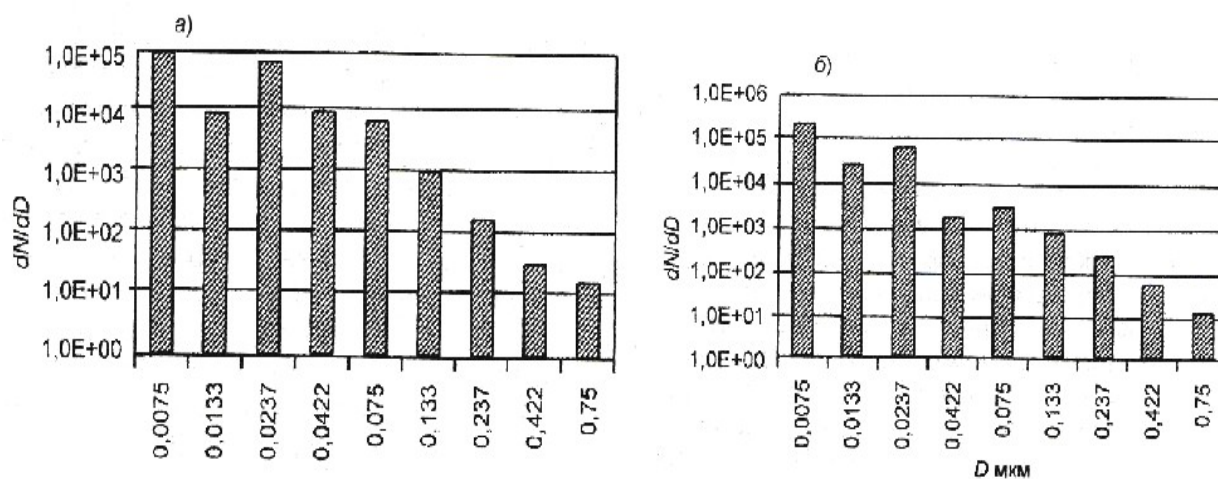


Рисунок 1. Плотность распределения частиц горения ПС по размерам в момент генерации (а) и после выдержки 30 мин (б).

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 $0,2\text{ с}$.

Концентрация электронов эмиссии в воздушной среде у поверхности частиц в зависимости от температуры и термоэлектронной работы выхода $\Phi = E_0 - F$ выражается как:

$$n_3 = 4\sqrt{2} \left(\frac{\pi m k T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left\{-\frac{\Phi}{kT}\right\} = 4,81 \cdot 10^{15} T^{3/2} \exp\left\{-\frac{\Phi}{kT}\right\} \text{ электр./см}^3, \quad (3)$$

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. Табл.2 иллюстрирует просто сильную зависимость n_3 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 2
Концентрация электронов эмиссии n_3 , см^{-3} у поверхности частиц,
рассчитанная в зависимости от температуры T и термоэлектронной работы выхода Φ

$T, K \backslash \Phi, \text{эВ}$	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	$7,05 \times 10^{18}$	$1,15 \times 10^{18}$	$4,05 \times 10^{16}$	$9,96 \times 10^{14}$

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 2000К 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.

В Главе 6 «Оценки ИВО и перспективные направления развития методов борьбы с лесными пожарами» приведены физические и экономические оценки ИВО на лесные территории. Работы по ИВО реагентами по патенту РФ 2090548 (ПВ-ФХС) проводились с 1993г. 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% (табл.3).

Таблица 3

Использование реагентов для тушения лесных пожаров в макетах пиропатронов ПВ-26

Воздействия	Реагент	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 осадков,(%)	ПВ-ФХС	21(25)	16(27)	31(28)	37(21)	2(3)	5(31)	9(6)
	ПВ-AgJ	40(31)		1(50)				

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 (табл.4).

Таблица 4

Площадь (S) погашенных лесных пожаров за 2000-2006 гг (га).

Авиабаза	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	итого за 7лет
Амурская	30							30
Дальневосточная		500	800	190				1490
Забайкальская	35			309				344
Западно-Сибирская		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-мансийская	376				5329			5705
Читинская	1348		1300	62700				65348
Якутская	170		950	180				1300
Итого	16693	945	6570	74496	13379	2215	19030	133328
Предотвращенный ущерб, тыс.долл. (S*25000\$)	417325	23625	164250	1862400	334475	55375	475750	3333200

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, противораковых 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 ИВО.

В заключении изложены основные результаты теоретических, экспериментальных и производственных работ, рассмотренных в диссертации, которые можно сформулировать следующим образом:

Впервые за последние 60-70 лет проведения работ по АВ 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 пиротехнического способа генерации заряженного реагента по патенту РФ № 2090548, подана 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, проявляющейся в разделении электрических зарядов в конвективном облаке в следствие испарения, дробления облачных капель и кристаллов и проявления эффекта Релея.

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 0,04мкм, 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, образовавшихся 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/см³, 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.

Разработаны технологии ИВО на лесные территории для снижения КПО 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 ИВО. 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 КПО практически до нуля. Для расчета КПО лесов, как правило, используют шкалу проф. Нестерова и ее региональные варианты. Предложен новый метод оценки пожароопасности, учитывающий суточные изменения температуры и относительной влажности.

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.

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.

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.

В приложении представлены результаты ИВО по авиабазам «Авиалесоохраны» РФ за 2000- 2006гг., акты испытания и внедрения.

Список публикаций по теме диссертации

Монографии:

- 1. 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.
- 2. 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.

Изобретения:

- 3. Козлов В.Н.** Устройство для создания тумана и облаков.// Патент РФ № 2045164. – 1995г.
- 4. Козлов В. Н.,** Мазуров Г.И., Мазурова Н.Н. Устройство для повышения температуры и увлажнения воздуха. Патент РФ № 2060640. – 1996г.
- 5. Козлов В.Н.,** Окунев С.М., Фомин В.А. Способ регулирования осадков из конвективных облаков.// Патент РФ № 2061358.- 1996г.
- 6. Козлов В.Н.,** Лихачев А.В., Окунев С.М., Фомин В.А. Аэрозольный кассетный генератор.// Патент РФ № 2073969.-1997г.
- 7. Козлов В.Н.,** Лихачев А.В., Окунев С.М., Фомин В.А., Пряхин П.Н. Способ управления погодой.// Патент РФ № 2075284.- 1997г.
- 8. Козлов В.Н.,** Лихачев А.В., Окунев С.М., Фомин В.А. Пиротехнический состав для вызывания осадков. Патент РФ № 2090548.- 1997 г.
- 9. Козлов В.Н.,** Лихачев А.В., Окунев С.М., Фомин В.А., Соснов А.В. Состав для рассеивания облаков и туманов. Патент РФ № 2090549.- 1997 г.
- 10. Козлов В.Н.,** Лихачев А.В. Пиротехнический состав для изменения атмосферных условий. Патент РФ № 2179800, 2001 г.
- 11. Козлов В.Н,** Будко Е. А., Лихачев А. В. Пиротехнический состав для изменения погодных условий. Патент РФ № 2181239, 2002 г.
- 12. Козлов В.Н.,** Будко Е. А, Лихачев А.В. Окунев С.М. Способ управления погодой. Патент РФ № 2191499, 2002 г.

13. Козлов В.Н., Коршун Н.А. Способ и устройство искусственного регулирования осадков. – Заявка на патент РФ № 2013107400 от 19.02.2013.

14. Козлов В.Н., Коршун Н.А. Способ инициирования грозových разрядов. - Заявка на патент РФ № 2013131639 от 09.19.07.2013.

Руководящие документы:

15. 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. **Козлов В. Н.**(руководитель темы) и др. // - СПб.: Гидрометеиздат, 2002.- 24 с.

16. РД 52.04.674-2006. Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от пожаров. **Козлов В. Н.**(руководитель темы) и др. //М.: Метеоагентство Росгидромета.- 2006-118с.

17. 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.(**Козлов В. Н. – исполнитель** и др.)// М.: Метеоагентство Росгидромета.- 2006-50с.

Статьи в трудах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК

18. Козлов В.Н. Физические основы искусственного образования облачности в верхней тропосфере.// Труды ГГО. – 2013 – В печати.

19. 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.

20. Козлов В.Н., Акселевич В.И., Мазуров Г. И. Метеоролого-экономическая модель метеозащиты мегаполиса.// Труды ГГО. – 2012. –Вып. – 566. – С. 182 – 202.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

Статьи в научных трудах и журналах:

25. Козлов В.Н., Коршун Н.А. Использование заряженного водного аэрозоля для активных воздействий на облака. Материалы Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь». –Филиал ИФЗ РАН «Борок». – 28 окт.-01ноября 2013. – С.54-55.

26. Козлов В.Н., Коршун Н.А. Метеорологический индекс пожарной опасности лесов. // Метеоспектр.- 2013. – Вып. 1. – С.85-95.

27. **Козлов В.Н.**, Коршун Н.А. Естественный природный реагент для активных воздействий на облака.- Метеоспектр.- 2013. – Вып. 3. – С. 103-115.
28. **Козлов В.Н.** Искусственное вызывание осадков заряженным реагентом. Материалы VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. – Санкт-Петербург. – 24-28сент. 2012. – С.127-128.
29. **Козлов В.Н.**, Доронин А.П., Мазуров Г.И., Акселевич В.И. Возможности предотвращения засух искусственно вызванными осадками.// Метеоспектр. - 2012- № 1 - С. 88 – 99.
30. **Козлов В.Н.**, Доронин А.П. Экономические аспекты метеозащиты крупных городов.// Метеоспектр.- 2012. – Вып. 3. – С. 113-123.
31. **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.
32. **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.
33. **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.
34. **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.
35. **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.
36. 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.
37. 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.
38. 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
39. Щукин Г.Г., **Козлов В. Н.**, Степаненко В.Д., Гальперин С.М., Стасенко В.Н. Активные воздействия на облачные системы с целью обеспечения воздействия для создания благоприятных погодных условий в период празднования 300-летия Санкт-Петербурга 30-31 мая 2003 г// Тр.НИЦ ДЗА (Филиала ГГО).2004.- Вып.5 (553). - С.143-168
40. **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
41. Клинго В.В., **Козлов В.Н.** Об электрических процессах в облаках.// Тр. НИЦ ДЗА (Филиала ГГО).- 2002.- Вып.4 (552).- С.44-54
42. Клинго В.В., **Козлов В. Н.**, Щукин Г.Г Физические основы образования заряженных гигроскопических частиц для искусственного регулирования осадков.// Тр. НИЦ ДЗА (Филиала ГГО).- 2002.- Вып.4 (552).- С.76-86.
43. **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.

44. Клинго В.В., **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В. Пиротехнический способ генерации ионогенных гигроскопических аэрозолей.// – Труды НИЦ ДЗА (филиала ГГО).- 2001. Вып.3 (549). - С.250-256.
45. Клинго В.В., **Козлов В.Н.** К теоретическому обоснованию применения ионогенных гигроскопических реагентов для вызывания осадков. // Тр.НИЦ ДЗА (филиала ГГО).-2001 Вып.3(549).- С.11-19.
46. 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.
47. 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.
48. Клинго В.В., **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В. Пиротехнический способ генерации ионогенных гигроскопических аэрозолей.// – Труды НИЦ ДЗА (филиала ГГО).- 2001. Вып.3 (549). - С.250-256.
49. Клинго В.В., **Козлов В.Н.** К теоретическому обоснованию применения ионогенных гигроскопических реагентов для вызывания осадков. // Тр.НИЦ ДЗА (филиала ГГО).-2001 Вып.3(549).- С.11-19.
50. **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.
51. **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.
52. **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.
- Доклады на научных конференциях:**
53. **Kozlov V.N.**, Korshun N.A., Emelianova N.A. Thermoionization Method of Lightning Activity Reduction. The Fifteenth International Conference on Atmospheric Electricity (ICAЕ 2014) will be held in Norman, Oklahoma, USA, 14-19 June 2014. p.1(представлено на конференцию).
54. 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 гидро-метеорологические процессы, посвященной 70-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР.// Нальчик, 28-29 сентября 2005 г. Изд. ЛКИ, 2008, С. 113-120.
55. 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.
56. 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.
57. **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.

58. Козлов В. Н., Шукин Г.Г. Разработка новой технологии искусственного регулирования осадков для борьбы с лесными пожарами. Доклад участников совещания-семинара по решению лесопожарных проблем. Санкт-Петербург, 2002.

59. Будко Е.А, Клинго В.В., **Козлов В.Н.**, Лихачев А.В., Окунев С. М., Шукин Г.Г. Использование легкомоторных воздушных судов для искусственного регулирования осадков в интересах лесного хозяйства. 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.// Гидрометеорологический издат. С-Пб., 2002.

60. Klingo V.V., **Kozlov V.N.**, Stasenko V.N., Shchukin G.G. Atmospheric Resources Control by the Use of Ionogeneous Hydroscopic Reagent. Seventh WMO Scientific Conference of Weather Modification. Thailand, 1999, v.2, p.301-302.

Подписано в печать 24.12.2013г. Формат 60x84/16
У.п.л. 1,37 Уч.-изд.л 1,37. Тир. 100экз.
Отпечатано в типографии ООО «Турусел»
197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова д.38. toroussel@mail.ru
Зак. № 13526 от 24.12.2013г.