

Председателю совета  
по защите докторских и кандидатских  
диссертаций Д 327. 005. 01 при ФГБУ «ГГО»  
доктору физико-математических  
В. П. Мелешко

**ОТЗЫВ**  
на диссертацию

**Козлова Владимира Николаевича**

**«Электрические методы искусственного регулирования  
осадков»**

представленную к публичной защите в ФГБУ «ГГО»  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук  
по специальности: 25.00.30-Метеорология, климатология и агрометеорология

Диссертация В.Н. Козлова посвящена решению актуальной научной и практической проблемы модификации теплых и водяных облаков, искусственного вызывания осадков (ИВО).

До настоящего времени при модификации облачных систем используются реагенты, разработанные в 40-х годах прошлого столетия. Наибольшее применение из них находит твердая углекислота, йодистое серебро, гигроскопические вещества и грубодисперсные порошки. Многие аспекты применения этих реагентов 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.

В результате проведенных теоретических исследований и экспериментальных работ разработаны и внедрены новые технологии защиты от градобитий, ИВО для снижения класса пожарной опасности лесов (КПО) и тушения лесных пожаров.

**Актуальность исследования** обусловлена увеличением количества природных чрезвычайных ситуаций, обусловленных аномальными атмосферными процессами: засухами, природными пожарами, наводнениями, сильными ливневыми осадками, грозами и необходимостью разработки и совершенствования существующих технологий модификации атмосферных процессов и регулирования осадков, предотвращения гроз и града.

**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 решены следующие **задачи**:

- 1) Разработка пиротехнического способа генерации заряженных аэрозолей с гигроскопическими свойствами (реагентов) для ИВО из конвективной облачности;
- 2) Исследование конденсационного роста, кристаллизации и укрупнения облачных частиц заряженным аэрозолем;
- 3) Разработка технологий ИВО с самолета 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 1966 г. по 1991 г. 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:**

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.

**Практическая значимость** работы заключается разработанной технологии ИВО из конвективной облачности на лесные территории, которые успешно использовались для снижения КПО лесов и тушения лесных пожаров с 1993 г. по настоящее время. При этом определяется пригодность облаков к засеву реагентами, рассчитывается количество ИВО, проводится наведение ИВО на очаг пожара, оценивается огнегасящий эффект выпадения осадков.

Эффективность технологии использования реагентов для ИВО подтверждена в экспериментальных работах по тушению лесных пожаров в 1998-2006 гг. Потенциальный экономический эффект от применения в ФГУ «Авиалесоохрана» разработанного в диссертационном исследовании реагента за 2000-2006 гг. оценивается свыше 3,3 млрд. долларов США.

Для ИВО предложено использовать модернизированные самолеты Ан-2п, новейшие противопожарные самолеты Ан-32п и Бе-200п, ИЛ-76 а также беспилотные воздушные суда.

**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 аэрозодем.

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

Диссертационная работа является логическим завершением исследований соискателя по разработке новых реагентов и технологии их использования для ИВО и предотвращения грозовых разрядов при охране лесов от пожаров.

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 грозовых разрядов (заявка на патент № 2013131639).

Основные результаты диссертационной работы, обобщающей 25 летние исследования соискателя, прошли достаточную апробацию на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, опубликованы в научной печати, в 2 монографиях (ISBN: 978-594652-359-2-2011; 978-3-659-46160-6-2013), в 10 патентах РФ на изобретения, в многочисленных статьях в изданиях, в том числе включенных в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК.

По формальным признакам претензий и замечаний к диссертационному исследованию нет.

По содержанию диссертационного исследования. Диссертация состоит из шести разделов, введения, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 307 страниц. Список литературы содержит 289 наименований.

Во введении автором проведена сегментация и позиционирование проблемы модификации атмосферных процессов, выявлены ее основные противоречия, проведено их ранжирование, что позволило выделить предмет научных исследований –

разработку новых и совершенствование существующих способов и технических средств воздействия на атмосферные процессы с целью ИВО, предотвращения засух, гроз и других опасных природных явлений.

В разделе 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. Отмечено, что 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.

Обсуждается отсутствие почасового суточного индекса пожарной опасности лесов. Предложен новый физически обоснованный индекс оценки пожарной опасности лесов, учитывающий суточные изменения температуры и относительной влажности по установленным восьми срочным наблюдениям метеовеличин. Учет относительной влажности воздуха является необходимым условием для оценки ИВО для профилактики и тушения лесных пожаров и существенно дополняет индекс Нестерова по срочным метеонаблюдениям.

Во втором разделе «Физические основы искусственного вызывания осадков водным аэрозолем» рассмотрена возможность применения баллоэлектрического эффекта с использованием 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 заслуживает внимания, так как позволяет использовать вместо реагентов (твердой углекислоты, йодистого серебра и гигроскопических веществ) природный водный аэрозоль. Введенные в облачную атмосферу водяные капли адсорбируют атмосферные ионы и электроны, превращаясь в электрически заряженные частицы, способные эффективно взаимодействовать с облачными каплями. Для государственной экспертизы научной и практической значимости полученных результатов применения баллоэлектрического эффекта подана заявка на патент РФ № 2013107400 от 19.02.2013 «Способ и устройство искусственного регулирования осадков».

Достоверность использования водного аэрозоля подтверждается аргументированным и логически непротиворечивым обоснованием автора, мировым опытом проведения подобных экспериментов. При использовании баллоэлектрического эффекта 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 конвективных облаках этот процесс приобретает цепной характер, приводящий к многократному выпадению осадков, крупные капли выпадают, а мелкие вновь укрупняются.

Несомненной новизной исследования является объяснение процесса укрупнения облачных капель при восходящих движениях. Этот процесс происходит не только за счет перенасыщения водяным паром вследствие переохлаждения в результате адиабатического расширения при вертикальном подъеме 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 восходящем потоке уменьшается на порядок, а их водность на порядок увеличивается при максимальном размере радиуса капель в 15-16 мкм.

В третьем разделе «Искусственное вызывание осадков водными растворами заряженных гигроскопических веществ» обосновано применение растворов

гигроскопических реагентов, в том числе морской воды, содержащей до 5% растворов солей для ИВО.

Засев гигроскопическими частицами континентальных облаков оказывает более сильное влияние на образование осадков. 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.

Автор предлагает рассматривать механизм электрокоагуляции для дальнейшего укрупнения капель солевого ядра до размера осадков. Степень точности расчета электрической коагуляции по известным формулам определяется, прежде всего, взятым значением коэффициента захвата  $E$  при столкновении капель.

Выполнен расчет электрической коагуляции первоначально заряженных капель. Полученные оценки соответствуют условиям гравитационной коагуляции капель до размера осадков.

В четвертом разделе приведено обоснование перспективных электрических методов воздействия на процессы облако- и осадкообразования. Вводятся новые понятия и определения энергии неустойчивости электрического происхождения, что является развитием идеи И.М. Имянитова, высказанной в 1965 г.

Проявление энергии неустойчивости электрического происхождения предложено разделять на микроэлектрическую и макроэлектрическую неустойчивость. Энергия неустойчивости первого вида проявляется при достижении предела Релея. В то время, как энергия неустойчивости второго вида проявляется в молниевых разрядах при накоплении критической величины электричества в отдельных объемах кучево-дождевого облака. В соответствие с этим могут быть установлены критерии для выражения энергии неустойчивости электрического происхождения как предел Релея для капель и предельное количество электричества при грозовых разрядах.

Мощные конвективные облака представляют собой неустойчивую коллоидную систему, находящуюся в метастабильном состоянии, чтобы вызвать осадки достаточно лишь небольшого внешнего воздействия. Этот основной принцип АВ применяется автором при рассмотрении всех представленных в работе методов.

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. Используя положения теории нуклеации, автор дает объяснение взаимодействия положительных и отрицательных ионов с облачными частицами. 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.

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 получаются 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.

В пятом разделе «Термоионизационный метод генерации заряженных аэрозольных частиц» представлен термоконденсационный способ генерации заряженных аэрозолей, используемых для реализации электрического метода воздействия. Запатентованный в РФ пиротехнический состав для генерации заряженных аэрозолей, состоящий из металлического горючего, щелочного металла и органического вещества, является открытием нового реагента для модификации конвективной облачности. Приведено объяснение взаимодействия заряженных аэрозолей с облачными каплями. Теоретически обосновано, что все электроны термоэмиссии уходят на образование отрицательных ионов молекул кислорода, которые присоединяя несколько нейтральных молекул, образуют легкие ионы.

Утверждается, что большинство гидратированных отрицательных ионов поглощается облачными каплями, что увеличивает их размеры. При достижении облачными каплями предела Релея происходит их разрыв с образованием более мелких положительно и отрицательно заряженных капель, которые адсорбируются и коагулируют с другими облачными частицами. Таким образом, происходит цепной процесс укрупнения облачных капель в конвективном облаке на первоначальной стадии образования осадков. При достижении каплями размеров с радиусом 18-20 мкм начинается их гравитационная коагуляция.

В шестом разделе «Оценки ИВО и перспективные направления развития методов борьбы с лесными пожарами» приведены физические и экономические оценки ИВО на лесные территории. Практическая реализация разработки заряженного реагента приведена в виде таблицы с результатами работ 15 авиабаз ФГБУ «Авиалесоохрана».

Для оценивания эффективности применения разработанного реагента автор приводит площадь погашенных лесных пожаров ИВО за 2000-2007 гг. с максимальной оценкой количества полностью погашенных лесных пожаров ИВО в 2005 г. (82%). Приведены оценки количества вызванных осадков для полного погашения пожаров за 2005 г., значительно превосходящие возможности самолетов-танкеров по сливу огнегасящей жидкости (воды).

Приведена оценка физической эффективности реагентов ПВ-ФХС и ПВ-26 с 2% составом  $AgI$ , свидетельствующая в пользу новых реагентов, а также оценка предотвращенного экономического ущерба ИВО за 2000-2006 гг.

Рассмотрены дальнейшие перспективы развития методов ИВО для снижения интенсивности (предотвращения) засух, приводящих к возникновению лесных пожаров, дано обоснование применения современных технических средств при организации пожаротушения ИВО.

К замечаниям по работе следует отнести излишнюю подробность рассмотрения гигроскопических реагентов в третьем разделе, подробный анализ характеристик технических средств, рекомендуемых в шестом разделе для ИВО, которые необходимы, но их можно было бы разместить в приложении.

К дискуссионным вопросам можно отнести терминологию природных, а не лесных пожаров, содержание Национальных стандартов по безопасности в чрезвычайных ситуациях, возможности учета вариаций предложенной в окрестности особых точек воды энергии неустойчивости электрического происхождения и др.

Диссертационное исследование является законченной квалификационной работой, которая написана грамотно, аргументированно и пронизана внутренней логикой. Иллюстрации подобраны удачно.

По содержанию автореферата замечаний нет. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Актуальность работы, обоснованность и достоверность ее научных положений не вызывает сомнений, новизна предложенных технических решений, способов и устройств подтверждается патентами РФ на изобретения. Достоверность, прикладная значимость и полезность полученных результатов подтверждается разработанными руководящими документами, утвержденными приказом Руководителя Росгидромета и внедрением в производственные работы на 15 авиабазах ФГБУ «Авиалесоохрана». Достоверность теоретических разработок подтверждается аргументированными и логическими непротиворечивыми рассуждениями, использованием фундаментальных физических законов, корректными математическими расчетами.

Диссертационная работа Козлова В.Н. является научно-квалификационной работой и представляет законченное научно-техническое исследование, что в совокупности можно квалифицировать как решение крупной народно-хозяйственной проблемы предотвращения засух на примере борьбы с лесными пожарами. Основные результаты диссертации опубликованы в монографиях, рецензируемых изданиях и журналах, рекомендованных ВАК РФ, патентах на изобретение.

Вывод. Представленная диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование и полностью отвечает требованиям ВАК Минобразования РФ, а ее автор Козлов Владимир Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология.

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
главный научный сотрудник ФГБУ «ИПГ»

А.В. Тертышников

Подпись доктора технических наук  
Тертышникова Александра Васильевича  
ПОДТВЕРЖДАЮ

Ученый секретарь ФГБУ «ИПГ»

кф-мн

Е.Н. Хотенко