

На правах рукописи

Куров Александр Борисович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Санкт-Петербург

2011 г.

Работа выполнена в государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Научный руководитель: доктор технических наук,
Синькевич Андрей Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Майборода Леонид Александрович,
кандидат физико-математических наук,
Кожевников Борис Леонидович

Ведущая организация: Государственное учреждение
«Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт»
(ГУ «ААНИИ») Росгидромета

Защита состоится “16” _____ марта _____ 2011г. в 14 часов
на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций
Д 327.005.01 государственного учреждения «Главная геофизическая обсерва-
тория им. А. И. Воейкова» по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбы-
шева, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного учре-
ждения «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова»

Автореферат разослан “14” _____ февраля _____ 2011г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций,
доктор географических наук

А. В. Мещерская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Гололедно-изморозевые явления в зимний период оказывают существенное влияние на работу промышленных предприятий, сельское хозяйство, транспорт, авиацию и проч. Основными последствиями образования гололедно-изморозевых отложений являются:

1. снижение сцепления, например, колес автотранспортных средств с поверхностью дорожного полотна;
2. увеличение массы элементов конструкции за счет собственной массы осевшего льда и, как следствие, возрастание механических нагрузок;
3. изменение аэродинамических свойств объектов за счет покрытия их слоем гололедно-изморозевых отложений, что в свою очередь создает увеличение ветровых нагрузок.

На практике это приводит к разрыву проводов линий электропередач и контактных сетей, обламыванию сучьев деревьев, автомобильным авариям и авиакатастрофам, поломке опор линий электропередач, антенно-мачтовых устройств и т.п. В связи с этим очевидна необходимость проведения систематических наблюдений за данными явлениями для оперативного оповещения населения и хозяйственных подразделений. Кроме этого, важной задачей является всестороннее изучение гололедно-изморозевых явлений с целью оценки создаваемых ими нагрузок в различных климатических зонах при проектировании воздушных линий электропередач и связи, контактных электрических сетей железнодорожного и городского транспорта, высотных конструкций и сооружений.

Активные исследования в области изучения гололедно-изморозевых явлений были начаты в нашей стране в 30-40е годы XX века. В этот период систематические наблюдения за этими явлениями велись на метеостанциях и постах с помощью специальной установки – гололедного станка, состоящего из четырех приемников обледенения в виде металлических проводов диамет-

ром 5 мм. В 50-60е годы было выполнено районирование территории СССР по нормативной толщине стенки гололеда, что стало возможным благодаря широкой сети метеостанций. Так, перед началом Великой отечественной войны насчитывалось более 100 станций, осуществляющих инструментальные наблюдения за гололедно-изморозевыми отложениями. В 50-е годы их количество значительно возросло и превысило 1000 станций, а в 60-е – приблизилось к 3000. В 60–70-е годы были начаты систематические наблюдения на высотной мачте Института экспериментальной метеорологии в Обнинске и на Останкинской телевизионной башне в Москве. К сожалению, в настоящее время количество метеостанций, где ведутся подобные наблюдения, существенно сократилось.

В ходе проведения исследований велись работы по совершенствованию и разработке новой измерительной аппаратуры. В 1951 году была усовершенствована конструкция гололедного станка. В 1957 году началось использование на сети станций разработанного В. Е. Бучинским гололедографа М-28. В дальнейшем регистраторы гололедно-изморозевых отложений вошли в состав многих автоматических метеорологических станций. Однако к настоящему времени ни один из разработанных приборов не смог заменить на метеостанциях гололедный станок, который в соответствии с текущей редакцией Наставления гидрометеорологическим станциям и постам по-прежнему является основным инструментальным средством наблюдения за гололедно-изморозевыми явлениями на территории РФ.

Инструментальные наблюдения с помощью гололедного станка выполняются вручную персоналом метеопоста, что ограничивает область его применения и вносит человеческий фактор в получаемые с его помощью данные.

Отметим, что большинство применяемых в настоящее время автоматических приборов и устройств для наблюдения за гололедно-изморозевыми отложениями ограничиваются измерением лишь их веса, не принимая во внимание размеры, плотность и вид. Однако, как показывает практика,

подобной информации недостаточно для проведения объективной оценки гололедно-ветровых нагрузок.

Актуальность темы диссертационной работы определяется тем, что в ней рассматриваются вопросы разработки и создания нового автоматизированного регистратора гололедно-изморозевых отложений. Большое внимание уделяется интерпретации получаемых данных с помощью созданного макета регистратора. Обсуждаются вопросы создания дистанционных средств определения интенсивности обледенения летательных аппаратов. Это особенно важно в связи с отсутствием современных автоматизированных инструментальных средств наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями.

Цель работы состоит в разработке методов и аппаратуры для наблюдения за гололедно-изморозевыми явлениями в атмосфере. В соответствии с этой целью в диссертационной работе поставлены и решаются следующие задачи:

- анализ основных технических характеристик используемых в настоящее время устройств и приборов для наблюдения за характеристиками гололедно-изморозевых отложений в практике метеорологических наблюдений, в промышленности, в народном хозяйстве и авиации.
- теоретическое обоснование способа регистрации характеристик гололедно-изморозевых отложений, основанного на методе распознавания образов.
- разработка и создание макета автоматизированного регистратора гололедно-изморозевых отложений для проведения наземных наблюдений.
- анализ работы макета регистратора гололедно-изморозевых отложений в лабораторных и натурных условиях.
- разработка способа регистрации параметров обледенения летательных аппаратов, использующего метод распознавания образов с возможностью получения данных о влиянии нарастающего слоя льда на аэродинамические свойства воздушного судна.

- оценка возможности расчета интенсивности обледенения летательных аппаратов, базирующегося на результатах лидарного зондирования облаков.

Метод исследования. Поставленные в настоящей работе задачи решались с использованием теории распознавания образов, теории измерений, теории решения обратных задач оптики атмосферы, а также с применением макетирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые применены методы анализа изображений с целью определения параметров обледенения.
2. Разработан и создан макет автоматизированного регистратора для проведения наземных наблюдений за гололедно-изморозевыми явлениями. Прибор позволяет проводить бесконтактное измерение массы и размеров отложений, образовавшихся на его приемниках; определять время начала и окончания процесса обледенения; рассчитывать интенсивность обледенения и таяния; определять вид отложений. Кроме этого, макет регистратора позволяет проводить визуальные наблюдения за процессами, происходящими на приемниках обледенения.
3. Проведены лабораторные и натурные исследования макета автоматизированного регистратора гололедно-изморозевых отложений. Показано, что макет прибора способен регистрировать образование различных видов отложения: гололедно-изморозевых (гололед, изморозь, мокрый снег), сухого снега, дождя. Результаты испытаний показали возможность работы макета регистратора в различных метеорологических условиях. В частности, экспериментально проверена работоспособность макета в диапазоне температур от -25°C до $+25^{\circ}\text{C}$, в условиях 100% влажности, при скоростях ветра до 11 м/с. Показана возможность проведения наблюдений за структурой отложений.

4. Предложено новое устройство обнаружения обледенения летательного аппарата, измерения интенсивности нарастания льда и определения его формы. Возможность определения формы слоя льда на приемнике обледенения позволяет не только фиксировать момент начала процесса обледенения летательного аппарата, но и проводить оценку влияния обледенения на аэродинамические характеристики воздушного судна.
5. Предложен новый дистанционный метод определения интенсивности обледенения летательных аппаратов, основанный на использовании данных лидарного зондирования. Применение метода позволяет заблаговременно рассчитать интенсивность обледенения воздушного судна с целью оценки степени опасности пересечения им облаков.

Практическая ценность состоит в том, что разработанный метод определения характеристик гололедно-изморозевых отложений и макет прибора могут быть использованы для создания серийно выпускаемого автоматизированного регистратора для применения на метеостанциях и постах, а также в труднодоступных местах с целью увеличения зоны покрытия. Важной особенностью прибора является возможность долговременной работы в автоматическом режиме без участия оператора. Устройство обнаружения обледенения летательного аппарата, измерения интенсивности нарастания льда и определения его формы может быть использовано в качестве датчика обледенения в составе противообледенительной системы самолетов, в том числе самолетов-лабораторий. Дистанционный метод определения интенсивности обледенения летательного аппарата с помощью лидара может быть использован для оценки возможного обледенения судна во время пролета мощных облаков.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод и макет автоматизированного регистратора гололедно-изморозевых отложений, базирующихся на теории распознавания образов.

2. Результаты лабораторных и натурных исследований макета регистратора гололедно-изморозевых отложений.
3. Устройство обнаружения обледенения летательного аппарата, измерения интенсивности нарастания льда и определения его формы.

Достоверность результатов. Разработанный макет регистратора гололедно-изморозевых отложений был отградуирован с использованием микрометра. Применены апробированные физические, математические и статистические методы исследований, обработки, анализа и обобщения данных.

Личный вклад автора. Основные научные результаты диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Автором лично проведен анализ литературных источников, анализ погрешностей работы регистратора, разработаны методы расчетов характеристик гололедно-изморозевых отложений, создано специальное программное обеспечение для обработки данных регистратора, выполнена интерпретация проведенных в рамках работы результатов лабораторных и натурных экспериментов. При участии автора была разработана конструкция макета регистратора гололедно-изморозевых отложений и устройства обнаружения обледенения летательного аппарата, измерения интенсивности нарастания льда и определения его формы; проведены лабораторные и натурные эксперименты; предложен метод дистанционного определения интенсивности обледенения летательного аппарата, основанный на использовании данных лидарного зондирования.

Апробация полученных результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались:

1. на всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред», Санкт-Петербург (2005, 2009).
2. на конференции «WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation», Санкт-Петербург (2008).

3. на специализированной выставке «Наука на службе производства Ленинградской области», Санкт-Петербург (2007, 2009).
4. на всероссийской научной конференции «Исследование процессов в нижней атмосфере при помощи высотных сооружений», Обнинск (2008).
5. на совещании «Определение основных направлений развития исследований в области искусственного регулирования атмосферных осадков и рассеяния туманов», Долгопрудный (2010).

В 2008 году за научно-исследовательскую работу по теме: «Аппаратно-программный комплекс автоматизированного регистратора гололедно-изморозевых отложений» присуждена премия Губернатора Ленинградской области и Санкт-Петербургского научного центра Российской академии наук для молодых ученых.

Внедрение результатов исследований. Результаты, представленные в диссертационной работе, были использованы в государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» при выполнении НИР «Сперансы» в 2006 – 2007гг.

Публикации. Результаты исследований и разработок, выполненных автором лично и совместно с другими авторами, отражены в одном патенте на изобретение и семи опубликованных статьях (три из них из списка изданий, рекомендованных ВАК).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы; содержит 144 страницы, включает 2 таблицы, 76 рисунков. Список литературы содержит 108 наименований на русском и английском языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагаются цели и задачи исследований, представляется научная новизна и практическая значимость, приведены результаты апробации работы, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится анализ существующих приборов и устройств для проведения наблюдений за гололедно-изморозевыми явлениями. В частности, рассмотрены следующие типы устройств: гололедный станок; гололедные весы (гололедограф); вибрационные датчики; емкостные датчики; инфракрасные и радиоизотопные датчики; оптические приборы; тепловые датчики и механические устройства. Кроме этого, в первой главе рассматриваются дистанционные методы определения зон обледенения летательных аппаратов и расчета интенсивности обледенения по данным метеорологических радиолокаторов и спутникового зондирования.

Показано, что наиболее полный объем информации о гололедно-изморозевых отложениях собирается при проведении измерений с использованием гололедного станка, представляющего собой две пары металлических проводов диаметром 5 мм, выступающих в качестве приемников обледенения. Высота подвеса проводов составляет 2 м. Первая пара проводов располагается в направлении север-юг, а вторая – в направлении запад-восток. С помощью гололедного станка фиксируются следующие характеристики обледенения:

- размеры отложений (малый и большой диаметры);
- масса отложения;
- вид отложения (гололед, кристаллическая или зернистая изморозь, отложение мокрого снега, сложное отложение);
- время начала и окончания процесса обледенения;

Все измерения с помощью станка выполняются персоналом метеостанции вручную, что является его существенным недостатком. Существующие в настоящее время автоматические приборы и устройства для наблюдения за гололедно-изморозевыми явлениями ограничиваются измерением лишь нескольких, но не всех, из представленных выше характеристик.

Во второй главе рассматриваются теоретические вопросы разработки автоматизированного регистратора, в основе работы которого лежит оптический метод измерения характеристик гололедно-изморозевых отложений. В частности, обсуждается вопрос о выборе приемника обледенения. Анализ конструкций используемых в настоящее время регистраторов обледенения показывает, что для проведения наблюдений за атмосферными гололедно-изморозевыми явлениями применяются приемники обледенения в виде цилиндрических стержней различного диаметра, ориентированные либо вертикально (гололедные весы, гололедограф), либо горизонтально (гололедный станок). Показано, что расположение приемника относительно направления воздушного потока существенно влияет на интенсивность его обледенения. В работе отмечается, что размеры приемника обледенения и скорость воздушного потока оказывают влияние на критический радиус капель, способных оседать на его поверхности.

Рассмотрен оптический метод определения размеров отложений. Метод заключается в применении оптического датчика высокого разрешения (например, матрицы, использующие технологию приборов с зарядовой связью (ПЗС)) для получения изображений приемника обледенения с образующимися на нём гололедно-изморозевыми отложениями. Проецирование изображения приемника обледенения на плоскость датчика осуществляется с помощью собирающей оптической системы (объектива). Определение характеристик отложений проводится на последующем этапе обработки и анализа получаемых изображений. В качестве источника излучения может выступать

либо специально разработанная осветительная система, либо естественное освещение.

Приводятся результаты лабораторных экспериментов, показывающих возможность применения данного метода на практике для проведения измерений размеров отложений.

Анализируются погрешности определения диаметра отложения на приемнике обледенения. Показано, что с увеличением толщины слоя наблюдается рост относительной погрешности измерения. Вследствие этого, в разрабатываемом приборе предусматривается возможность удаления отложений с приемника обледенения при превышении критического значения толщины слоя. Сброс отложений может быть проведен за счет прогрева приемника обледенения. Кроме этого, отмечается, что на величину погрешности оказывает существенное влияние выбор параметров оптической системы. Приводятся соотношения для расчета диаметра отложения, позволяющие на этапе обработки данных значительно уменьшить систематическую погрешность измерений малого и большого диаметров отложения.

Для определения массы отложения на приемнике обледенения предлагается использование оптического метода. Для этого приемник обледенения устанавливается на двух динамометрических стойках, обеспечивающих его смещение по вертикали при увеличении веса отложения. При этом масса отложения будет пропорциональна величине смещения приемника обледенения, которая может быть определена в ходе выполнения анализа получаемых изображений.

В третьей главе приводится описание разработанного и созданного макета регистратора гололедно-изморозевых отложений ИО-1, а также выполнен анализ его работы в полевых условиях. Приемниками обледенения в макете служат два металлических цилиндрических стержня диаметром 10 мм. Для получения изображений приемников обледенения в макете используется цифровая фотокамера, оснащенная ПЗС-матрицей высокого разреше-

ния. Приемники располагаются перпендикулярно друг другу на разной высоте для того, чтобы в поле зрения камеры находилась боковая поверхность первого приемника и торец второго. Для обеспечения работоспособности камеры в сложных погодных условиях и защиты от механических нагрузок, она монтируется внутри специального защитного бокса – блока фоторегистратора. В качестве источников излучения используются мощные светодиоды, расположенные вокруг объектива камеры. Для обеспечения высокой контрастности получаемых изображений используется специальный экран с чернением, располагающийся за приемниками обледенения. Все узлы макета крепятся на жесткой алюминиевой раме. Первый приемник обледенения монтируется на динамометрических стойках. Величина смещения приемника под тяжестью образовавшихся на нем отложений, что требуется для расчета их массы, оценивается по контрольной нити, закрепленной параллельно приемнику.

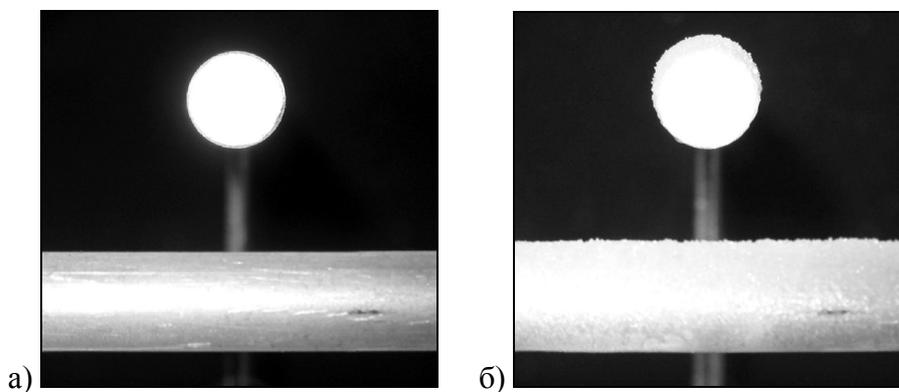


Рис. 1. Примеры изображений приемников обледенения макета регистратора.
а) в отсутствие обледенения; б) при наличии обледенения.

Анализ получаемых с помощью макета регистратора изображений (рис. 1) осуществляется на персональном компьютере. Он позволяет в автоматическом режиме рассчитывать следующие характеристики отложений: толщина слоя отложения, масса отложения, интенсивность роста или таяния

слоя, время начала и конца обледенения. Кроме этого существует возможность проведения визуального наблюдения за процессами, происходящими на приемниках обледенения, в частности, для определения вида отложения.

Работа макета регистратора состоит из трех основных этапов:

1. получение изображения приемников обледенения;
2. обработка и анализ изображений с целью извлечения информации об отложениях;
3. сброс отложений при достижении слоем максимально допустимых размеров за счет прогрева приемника обледенения.

Данные этапы циклически повторяются с заданным интервалом времени на всем протяжении работы прибора. Для реализации алгоритма разработано специальное программное обеспечение. Изображения, полученные с помощью макета, сохраняются на компьютере в виде графических файлов и в дальнейшем обрабатываются. Бинаризация позволяет выделить на изображении области, соответствующие контрольной нити и приемникам обледенения с образовавшимися на них гололедно-изморозевыми отложениями, и рассчитать их размеры.

В рамках проведения натурных испытаний было выполнено две серии экспериментов: в период с января по март 2007 года в г. Санкт-Петербург и с января по апрель 2008 года в пос. Воейково Ленинградской области. За время испытаний макета регистратора было проведено более 3400 измерений. При этом на приемниках обледенения фиксировались следующие виды отложений: капли дождя, снег, мокрый снег, изморозь, гололед, включая сложные отложения. Испытания показали принципиальную возможность проведения автоматизированных наблюдений за гололедно-изморозевыми явлениями и измерения характеристик обледенения с применением выбранного оптического метода.

В четвертой главе обсуждается возможная конструкция и особенности работы устройства обнаружения обледенения летательного аппарата, измерения интенсивности нарастания льда и определения его формы.

В качестве приемника обледенения в устройстве используется цилиндрический стержень, ось которого расположена перпендикулярно набегающему воздушному потоку. При сильной степени обледенения предусмотрен сброс льда за счет прогрева приемника с помощью встроенного нагревательного элемента. Чувствительным элементом прибора является оптический датчик фоторегистратора, расположенного так, чтобы в его поле зрения попал торец стержня. Это позволяет определять распределение льда по поверхности приемника обледенения. Благодаря этому появляется возможность не только определения момента начала обледенения и расчета его интенсивности, но и оценки изменения аэродинамических характеристик воздушного судна вследствие отложения льда.

Выполнен анализ возможности применения оптических локаторов (лидаров) для оценки интенсивности обледенения летательных аппаратов. На основе корреляционной зависимости интенсивности обледенения самолета от дальности видимости в облаках получено выражение, связывающее коэффициент ослабления излучения в видимом диапазоне спектра с интенсивностью обледенения при различных скоростях полета. Коэффициент ослабления может быть рассчитан по данным лазерного зондирования, а, значит, лидар может быть использован для дистанционного определения степени опасности пролета через облачность. Показано, что применение лидара возможно лишь в случае решения уравнения оптической локации с учетом многократного рассеяния.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Проведенный анализ основных технических характеристик используемых в настоящее время устройств и приборов для наблюдения за голо-

ледно-изморозевыми явлениями в практике метеорологических наблюдений показал необходимость разработки нового автоматизированного регистратора в качестве альтернативы гололедному станку.

2. Теоретически разработан оптический метод регистрации характеристик гололедно-изморозевых отложений. Выполненные расчеты показали возможность проведения измерений размеров отложений и их веса на горизонтально расположенных цилиндрических приемниках обледенения. Предложены варианты уменьшения систематической погрешности измерений, возникающей вследствие применения собирающей оптической системы.
3. Разработан и создан макет автоматизированного регистратора гололедно-изморозевых отложений, реализующий оптический метод измерений. Макет позволяет в автоматическом режиме проводить измерения размеров отложений на приемниках обледенения, их веса, времени начала и окончания процесса обледенения, его интенсивности. Выходными данными макета являются изображения приемников обледенения с образующимися на них отложениями, обработка и интерпретация которых проводится на подключенном к регистратору персональном компьютере. Вид отложения на этапе макетирования определяется визуально, однако существует принципиальная возможность разработки соответствующих алгоритмов для проведения их автоматической классификации. Применение в конструкции компактной цифровой камеры позволяет существенно снизить затраты на производство прибора.
4. Выполнены лабораторные и натурные исследования разработанного макета регистратора ГИО. Полученные результаты показали применимость оптического метода для решения поставленных задач, а также работоспособность регистратора в натуральных условиях. Проведен анализ примененных конструкторских решений, позволивший определить пути доработки прибора.

5. Предложено устройство обнаружения обледенения летательного аппарата, измерения интенсивности нарастания льда и определения его формы. В основе работы устройства лежит оптический метод определения характеристик обледенения. Достоинством устройства является возможность оценки распределения льда по поверхности приемника обледенения, что является важным при исследовании влияния обледенения на аэродинамические характеристики самолета. Кроме этого, данная информация позволяет определять время начала и окончания обледенения, а также его интенсивность.
6. Предложен метод расчета интенсивности обледенения летательных аппаратов, базирующийся на результатах лидарного зондирования облаков, позволяющий заранее выполнять оценку степени опасности обледенения воздушных судов в облаках. В частности, на основе экспериментальных данных получено выражение, связывающее интенсивность обледенения с коэффициентом ослабления излучения в видимом диапазоне спектра, которое может применяться при использовании, например, лидаров с лазером на рубине.

Список публикаций по теме диссертации

1. Куров А.Б., Волков Н.Н., Окоренков В.Ю., Синькевич А.А., Степаненко В.Д. Автоматизированный регистратор гололедно-изморозевых отложений ИО-1. – Труды ГГО, 2007, вып. 556. с.192-201.
2. Куров А.Б. Результаты натурных испытаний регистратора гололедно-изморозевых отложений ИО-1. – Труды ГГО, 2009, вып. 559. с.237-251.
3. Синькевич А.А., Довгалиук Ю.А., Степаненко В.Д., Веремей Н.Е., Волков Н.Н., Куров А.Б., Пивоварова Л.В. Некоторые аспекты ис-

следования конвективных облаков и осадков. – Труды ГГО, 2009, Вып. 560, с.168-188.

4. Степаненко В.Д., Волков Н.Н., Куров А.Б., Окоренков В.Ю., Синькевич А.А. Патент №2377496 от 28 июня 2007 г. на изобретение "Устройство обнаружения обледенения летательного аппарата, измерения интенсивности нарастания льда и определения его формы". – Бюл. №36, 2009.

В других научных журналах и трудах:

5. Куров А.Б. Устройство и результаты испытаний нового регистратора гололедно-изморозевых отложений. – В сб. тезисов всероссийской научной конференции «Исследование процессов в нижней атмосфере при помощи высотных сооружений», Обнинск, Октябрь 2008. с.85-88.
6. Kurov A., Okorenkov V., Sinkevich A., Sokolenko S., Stepanenko V., Volkov N. Automatic icing probe. - Instruments and observing methods, Report No.96. WMO/TD — No.1462.
7. Куров А.Б., Степаненко В.Д., Егоров А.Д., Синькевич А.А. Определение дальности обнаружения аэрозольной атмосферы с помощью самолетного лидара дифференциального поглощения. - Труды XXIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», 2005, вып. 5. с.525-528.
8. Довгалоук Ю.А., Синькевич А.А., Степаненко В.Д., Веремей Н.Е., Волков Н.Н., Куров А.Б. Состояние и перспективы развития лабораторного комплекса ГГО для исследований в области физики облаков и активных воздействий. – В сб. Вопросы физики облаков, СПб.: Астерион, 2008, с.334-361.