

Акционерное общество «КТ-Беспилотные Системы»

УДК 551.576+551.594

На правах рукописи

Торгунаков Роман Евгеньевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ КОНТРОЛЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЛАКОВ

Специальность: 1.6.18. Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в АО «КТ-Беспилотные Системы»

**Научный
руководитель:**

Синькевич Андрей Александрович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
главный научный сотрудник, Отдел геофизического
мониторинга и исследований ФГБУ «Главная
геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»,
г. Санкт-Петербург

**Официальные
оппоненты:**

Абшаев Али Магомедович,
доктор физико-математических наук, доцент, ведущий
научный сотрудник, руководитель проекта, ООО
«Научно-Производственный Центр «Антиград»,
г. Нальчик

Юсупов Игорь Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук, ведущий
инженер, Учебная лаборатория радиофизики, ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный университет»,
г. Санкт-Петербург

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет», г. Томск

Защита диссертации состоится «26» сентября 2024 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.365.02 по адресу 195196, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.365.02
кандидат физ.-мат. наук,



Т.С. Ермакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Электрические явления в атмосфере и электрические свойства атмосферы имеют существенное значение для метеорологических процессов и для практической деятельности человека. Процессы, происходящие в атмосфере и в облаках, не только тесно связаны с электричеством атмосферы, но и сами в значительной степени формируют его. Исследование электрических характеристик атмосферы имеет фундаментальное значение для понимания физических процессов, происходящих в атмосфере и в облаках. Для измерения электрических полей атмосферы и заряда летательного аппарата (ЛА) в настоящее время используются системы измерителей, состоящие из нескольких расположенных на борту самолета электростатических флюксометров.

Актуальность темы исследования определяется тем, что используемые многими авторами методы калибровки бортовых измерителей обладают существенными недостатками, трудно реализуемы на практике или не обеспечивают необходимую точность. Это свидетельствует о необходимости установки большего числа датчиков, тщательного выбора мест установки и корректировки методики определения калибровочных коэффициентов с использованием компьютерного моделирования и других методов. В связи с этим тема диссертации, посвященная разработке методов калибровки систем измерителей, обработке и анализу результатов измерений напряженности электрического поля атмосферы при помощи летательных аппаратов, является значимой и актуальной в научном и практическом планах.

Получение новых данных о напряженности электрического поля в облаках разных типов, полученных при помощи более совершенной методики, позволит улучшить понимание фундаментальных физических процессов, протекающих в свободной атмосфере и в облаках.

Рассматриваемые в работе вопросы приобретают особую актуальность при оборудовании новых самолетов-лабораторий аппаратурой для измерения напряженности электрического поля. Точный расчет калибровочных коэффициентов позволит сократить необходимое количество специальных дорогостоящих полетов, дополнительно проводимых для их корректировки.

Степень разработанности темы исследования. Основы методики измерений напряженности электрического поля атмосферы или облаков и заряда самолета с помощью системы приборов, установленных на самолете-лаборатории, были разработаны И.М. Имянитовым и развиты в работах, проводимых впоследствии Б.Ф. Евтеевым, Е.В. Чубариной, Ю.Ф. Пономаревым, Ю.П. Михайловским, А.А. Синькевичем.

Эти основы позволили проводить измерения напряженности поля в атмосфере и в облаках при помощи самолетов-лабораторий, однако дальнейшие исследования показали, что собственный заряд самолета даже в безоблачной атмосфере делает измерение окружающей напряженности поля крайне сложной методической задачей, существующие методы повышения точности измерений эффективны, но зачастую трудновыполнимы, а погрешности измерений могут

превышать 100 %. Усложнение условий измерений (использование имеющих большой собственный заряд и насыщенных научной аппаратурой самолетов-лабораторий) и изменение требований к точности измерений, учитывая уникальность таких измерений и сложности с оценкой ошибок этих измерений, приводят к необходимости задаваться вопросом совершенствования методов самолетных измерений напряженности поля. Недостаточное внимание к этим вопросам может привести к неверным физическим выводам.

Целью диссертации является совершенствование существующих методов измерений электрических полей в атмосфере с помощью бортовых измерителей для уменьшения погрешностей измерений с бортов ЛА и получение новых данных об электрических полях и заряде самолета в конвективных, слоистообразных облаках.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие **задачи**:

- анализ методов измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда самолета;
- разработка математических моделей для расчета зарядов летательных аппаратов и электрических полей, создаваемых летательным аппаратом;
- разработка методики измерений напряженности электрического поля и заряда летательных аппаратов с использованием компьютерного моделирования, оценка точностных характеристик измерений напряженности электрического поля при помощи летательных аппаратов;
- расчет калибровочных характеристик самолетных измерителей на основе данных компьютерного моделирования для самолетов Ил-14, Як-42Д, беспилотного летательного аппарата среднего типа большой продолжительности полета (БпЛА);
- анализ данных самолетных измерений электрических характеристик в конвективных, высокосолистых и перисто-слоистых облаках при помощи разработанной методики;
- исследование неоднородностей электрических структур облаков.

Предметами исследования являются методы и результаты измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда летательного аппарата.

Объектами исследования являются электрическое поле в атмосфере и заряды летательных аппаратов.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

1. Выявлены недостатки используемых в настоящее время способов определения калибровочных коэффициентов искажения электрического поля самолетом и его зарядом.

2. Разработана методика математического моделирования электростатических полей, использующая правдоподобную трехмерную модель летательного аппарата и позволяющая осуществлять поиск оптимального расположения измерителей на самолете, определять расположение электрических нейтралей, на основе полученных в результате моделирования данных решать задачу определения матрицы калибровочных коэффициентов. Методика была продемонстрирована на примере самолетов Ил-14, Як-42Д, беспилотного

летательного аппарата. Компьютерное моделирование позволяет определять также и заряд самолета.

3. Исследована возможность применения БПЛА в качестве самолета-лаборатории для исследования электрических полей атмосферы. Выполнен сравнительный анализ результатов моделирования электрического поля при искажении его корпусом и собственным зарядом пилотируемых самолетов, используемых в качестве самолетов-лабораторий, и беспилотного летательного аппарата.

4. При помощи разработанной методики получены матрицы калибровочных коэффициентов и осуществлен анализ результатов исследования электрических полей и заряда летательного аппарата, полученных при помощи самолетов Ил-14, Як-42Д «РОСГИДРОМЕТ» и других.

Теоретическая и практическая значимость работы. В диссертации поставлена и решена актуальная научная задача измерения электрических полей атмосферы с помощью летательных аппаратов на основе математического моделирования электростатических полей и заряда летательного аппарата за счет выбора оптимальной конфигурации датчиков, установленных на летательном аппарате, и определения калибровочных коэффициентов.

Предложенная методика измерения электрических полей атмосферы позволяет существенно повысить точность и чувствительность измерений, а следовательно, получать надежные и достоверные данные об электрических полях атмосферы и неоднородностях электрической структуры облаков различных форм, а также сократить количество специальных полетов, требующихся для дополнительной калибровки измерительной системы.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач были использованы методы математического моделирования электростатических процессов, метод расчета электростатического поля при помощи уравнения Пуассона. В ходе анализа результатов экспериментальных исследований применялись методы статистической обработки данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование физико-математического моделирования электростатических полей на поверхности летательного аппарата позволяет более точно определять величину искажения направления и величины электрического поля в пространстве вокруг него, чем другие методы.

2. Методика определения оптимального расположения датчиков на борту ЛА, расчета калибровочных коэффициентов для измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда летательного аппарата, первоначальной оценки калибровочных коэффициентов и их дальнейшей корректировки.

3. Для исследования характеристик электрических полей атмосферы могут быть использованы изготовленные из композиционных материалов БПЛА.

4. Результаты анализа экспериментальных данных по напряженности электрического поля и заряду самолета, полученных в разные годы при помощи самолетов-лабораторий:

– рассчитаны величины напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках, высокостроистых и перисто-слоистых облаках;

– выявлена тенденция к увеличению по модулю величин напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках с увеличением влажности;

– выявлена тенденция к уменьшению напряженности электрического поля и снижению по модулю заряда самолета при уменьшении температуры окружающего воздуха.

Степень достоверности результатов обеспечивается анализом предшествующих научных работ в области измерений напряженности электрического поля атмосферы, большим объемом исходных данных. Полученные результаты не противоречат результатам других предшествующих исследований по данной тематике и существующим представлениям о физических характеристиках атмосферы и облаков.

Апробация результатов. Основные результаты исследований и материалы диссертации докладывались:

– на семинарах отдела физики облаков и атмосферного электричества ФГБУ «ГГО»;

– на заседании научно-технического совета АО «КТ-Беспилотные Системы»;

– на XXX Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (СПб, 2017);

– на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (СПб, 2017);

– на XXI Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Борок, 2017);

– на Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (Нальчик, 2017);

– на V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (СПб, 2018).

Разработанная методика внедрена при анализе данных, полученных в ходе летных экспериментов по измерению электрических полей и собственного заряда самолетов Ил-14 и Як-42Д. Полученные на ее основе калибровочные коэффициенты также использованы в ходе выполнения НИР «Предоставление информационно-аналитических данных по структурам электрических полей облаков», выполненной в ГГО им. А.И. Воейкова в 2018 г.

Личный вклад автора. Автор разработал предлагаемую в работе методику, принимал участие в подготовке и обработке исходных материалов, провел анализ и обобщение полученных результатов.

Публикации. Основные научные результаты диссертации изложены в 9 научных публикациях, в том числе в 4 рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации и в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня сокращений и списка используемых

источников. Общий объем работы составляет 138 страниц, работа иллюстрирована 78 рисунками и 24 таблицами. Список используемых источников содержит 116 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы и решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна, обоснованы теоретическая ценность и практическая значимость полученных результатов работы.

Первая глава посвящена исследованию литературных данных об источниках и причинах появления сильных электрических полей в атмосфере, а также обзору методов исследования электрических характеристик атмосферы.

В главе представлен современный взгляд на процессы электризации, которые считаются играющими наибольшую роль в образовании областей заряженных частиц в облаках: ионная электризация, электризация крупных ледяных частиц при столкновении с облачными кристаллами и с переохлажденными облачными каплями. Утверждается, что исследование электрических характеристик атмосферы имеет фундаментальное значение для понимания физических процессов, происходящих в атмосфере и в облаках.

Особенно сильные процессы электризации облачных частиц и гидрометеоров, приводящие к разделению зарядов, образованию заряженных областей, формированию электрической структуры с напряженностью поля, достаточной для образования грозовых разрядов, происходят в кучево-дождевых облаках. Рассмотрены основные этапы образования электрической структуры грозового облака.

Далее в первой главе даны определения градиента потенциала и напряженности электрического поля атмосферы у поверхности земли и приведены их характерные особенности. Перечислены основные способы измерения напряженности поля и градиента потенциала: при помощи различного рода устройств для выравнивания потенциала (коллекторов) и при помощи динамических приборов, основанных на принципе попеременного экранирования и экспонирования проводника, соединенного с измерительным прибором, в электрическое поле (приборов напряженности поля).

Одним из препятствий для измерения атмосферно-электрических характеристик и микрофизических характеристик облаков при помощи предназначенных для этого самолетов или других летательных аппаратов является электрический заряд на их поверхности. Поэтому далее в работе рассмотрены основные механизмы зарядки самолета в облаках и осадках: статическая электризация и электризация самолета, связанная с работой его двигателей.

В заключение первой главы приведен обзор используемых методов измерения электрических полей при помощи летательных аппаратов: аэростатов, планеров и самолетов. При исследованиях кучевых или кучево-дождевых облаков быстро и надежно проводить измерения в любых метеоусловиях можно при помощи самолетов, благодаря их скорости и маневренности. Использование

специализированных самолетов-лабораторий для исследования атмосферного электричества позволяет одновременно проводить целый ряд других параллельных исследований.

На основании опыта российских и зарубежных исследователей сделан вывод, что для надежных измерений напряженности электростатического поля при помощи самолета в одном направлении необходимо использовать систему, состоящую как минимум из двух, а лучше – из трех измерителей, для измерений всех трех компонент электрического поля требуется установка пяти – шести измерителей и более, а наиболее подходящим прибором для измерения электростатических полей при помощи самолетов является электростатический флюксометр.

Основная задача при подготовке специализированных самолетов-лабораторий состоит в калибровке измерительной системы с учетом искажений электрического поля самолетом. Существуют различные способы произвести калибровку измерительной системы: при помощи масштабного или компьютерного моделирования воздушного судна, а также с помощью выполнения специальных полетов в условиях «хорошей погоды» путем совершения эволюций по тангажу и крену, когда значения измеряемых электрических полей в атмосфере могут быть оценены с высокой точностью независимыми измерениями.

Анализ работ российских и зарубежных исследователей, использовавших различные методы калибровки, показал, что с учетом достоинств и недостатков наиболее перспективным методом для определения калибровочных коэффициентов является использование компьютерного моделирования.

Во **второй главе** описана математическая модель измерений напряженности электрического поля и заряда летательных аппаратов при помощи системы из установленных на борту самолетов-лабораторий приборов напряженности поля. Приведена оценка погрешностей измерения, вызванная погрешностями измерителей и несовершенством методов определения калибровочных коэффициентов. Разработана общая схема алгоритма моделирования электростатических полей с целью определения и уточнения матрицы калибровочных коэффициентов, даны рекомендации по расположению датчиков на борту самолетов-лабораторий. Приведены результаты моделирования и расчет калибровочных коэффициентов самолетов Ил-14 и Як-42Д.

Для решения задачи измерения напряженности поля необходимо найти соотношение между окружающим полем и выходным сигналом флюксометров. Если принять зависимость между напряженностью электрического поля и выходными сигналами флюксометров линейной, то можно описать модель измерений в матричном виде:

$$\mathbf{a} = \mathbf{M}\mathbf{e}, \quad (1)$$

где \mathbf{a} – вектор выходных значений полезного сигнала флюксометров:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}, \quad (2)$$

\mathbf{e} – вектор значений напряженности внешнего электрического поля и заряда летательного аппарата:

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_X \\ e_Y \\ e_Z \\ e_Q \end{bmatrix}, \quad (3)$$

\mathbf{M} – калибровочная матрица размером $m \times 4$:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{1X} & M_{1Y} & M_{1Z} & M_{1Q} \\ M_{2X} & M_{2Y} & M_{2Z} & M_{2Q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{mX} & M_{mY} & M_{mZ} & M_{mQ} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где m – количество установленных на борту ЛА датчиков.

Решая уравнение (1) относительно \mathbf{e} , получим:

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= \mathbf{M}^{-1}\mathbf{a}, \\ \mathbf{e} &= \mathbf{B}\mathbf{a}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \mathbf{B} – матрица, обратная матрице \mathbf{M} :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{X1} & B_{X2} & \cdots & B_{Xm} \\ B_{Y1} & B_{Y2} & \cdots & B_{Ym} \\ B_{Z1} & B_{Z2} & \cdots & B_{Zm} \\ B_{Q1} & B_{Q2} & \cdots & B_{Qm} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Анализ источников погрешностей измерений напряженности электрического поля и заряда летательного аппарата показал, что погрешности ранее используемого метода определения коэффициентов формы путем масштабного моделирования при большом заряде самолета и малых электрических полях служат источником значительной погрешности измерений, а к данным, полученным при помощи данного метода, следует относиться с осторожностью, калибровочные коэффициенты следует определять более точными методами, например, при помощи компьютерного моделирования.

Следует также отметить, что компьютерное моделирование позволяет моделировать различные антенны и обтекатели, изменяющие эквивалентную электрическую форму и емкость самолета, что невозможно при использовании других методов моделирования. Это является немаловажным при высокой насыщенности измерительной аппаратурой современных самолетов-лабораторий и при изменении их конфигурации в ходе модернизации.

Предлагаемая методика определения матриц калибровочных коэффициентов включает в себя следующие этапы:

- 1) разработка модели летательного аппарата;
- 2) выбор расположения датчиков на самолете-лаборатории;
- 3) моделирование электрического поля;
- 4) расчет и анализ матрицы калибровочных коэффициентов для выбранных вариантов расположения датчиков;
- 5) уточнение расположения датчиков на самолете-лаборатории;
- 6) выполнение специальных полетов для уточнения матрицы калибровочных коэффициентов.

В качестве моделей для расчета матриц калибровочных коэффициентов были выбраны существующие самолеты-лаборатории Ил-14 и Як-42Д. Самолет-лаборатория Ил-14 использовался ГГО им. А.И. Воейкова при проведении научно-исследовательских проектов в период с 1977 г по 1990 г и был оснащен большим количеством измерительного оборудования: комплексом приборов ПНП (электростатических флюксометров) для измерения напряженности электрического поля, ИК-радиометром, прибором для измерения водности облаков, ультразвуковым анемометром и другими приборами. Самолет-лаборатория Як-42Д «Росгидромет» создавался в период с 2010 г по 2013 г и был оборудован более чем 100 приборами и датчиками, включающими в себя программно-аппаратные комплексы для измерения газового и аэрозольного состава атмосферы, потоков рассеянной солнечной радиации, термодинамических параметров атмосферы, микрофизических параметров облаков, радиоактивности и атмосферного электричества, параметров подстилающей поверхности и океана.

В результате моделирования были получены распределения электрических полей вокруг моделей самолетов Ил-14 и Як-42Д, распределения зарядов на поверхности, расположения электрических нейтралей, рассчитаны матрицы калибровочных коэффициентов при различных вариантах расположения используемых датчиков.

Модель самолета Ил-14, заряженного до величины $Q = 10^{-5}$ Кл, помещенная в свободную от внешнего электрического поля среду, изображена на рис. 1. Здесь и далее – E (В/м) – напряженность электрического поля; Q_{Surf} (Кл· $10^{-9}/\text{м}^2$) – поверхностная плотность заряда.

Расположение электронейтралей самолета Ил-14, полученное в результате моделирования электрического поля, приведено на рис. 2.

Разница между значениями коэффициентов, полученными новым и старым методами, составляет до 35 %, подобные различия и несоответствия при сравнении с коэффициентами, полученными при помощи масштабных моделей, наблюдались исследователями и ранее.

Модель самолета Як-42Д, заряженного до величины $Q = 10^{-5}$ Кл, помещенная в свободную от внешнего электрического поля среду, изображена на рис. 3.

Расположение электронейтралей самолета Як-42Д, полученное в результате моделирования электрического поля, приведено на рис. 4.

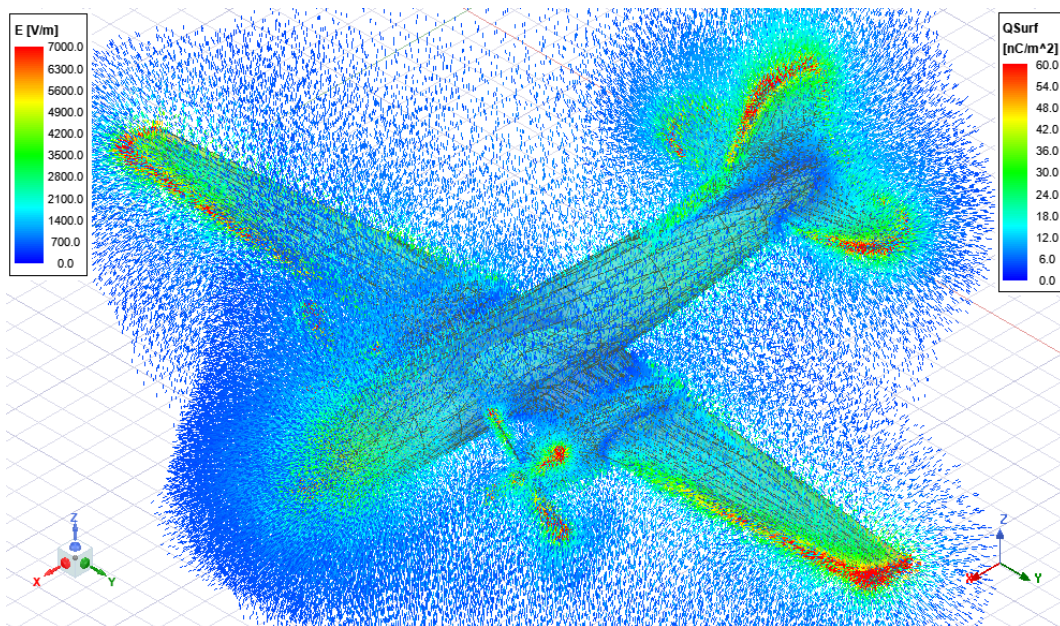


Рисунок 1 – Модель заряженного самолета Ил-14 ($Q = 10^{-5}$ Кл) в условиях отсутствия внешнего электрического поля

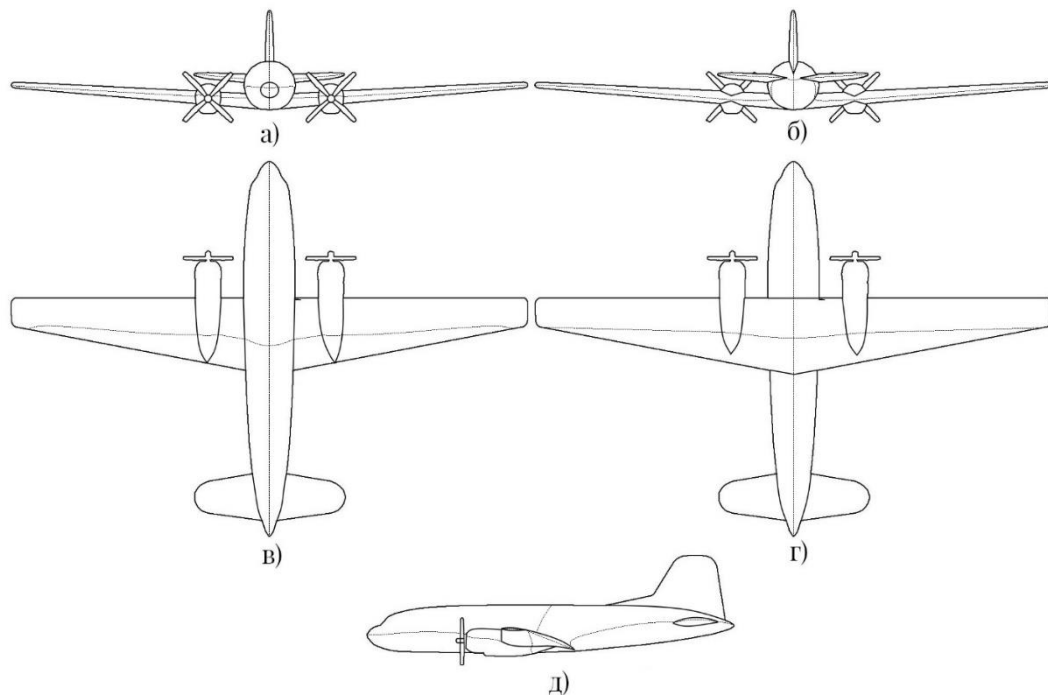


Рисунок 2 – Расположение электронейтралей на поверхности модели самолета Ил-14: а) вид спереди, б) вид сзади, в) вид сверху, г) вид снизу, д) вид слева

Таким образом, впервые был осуществлен расчет калибровочных коэффициентов датчиков, впоследствии использованных на практике для анализа данных летных экспериментов самолетов-лабораторий, методом компьютерного математического моделирования. Анализ показал, что применявшиеся ранее в ходе многочисленных предшествующих опытов способы определения матриц калибровочных коэффициентов требуют серьезной доработки, а также требуют использования совокупного комплексного подхода к первоначальной оценке калибровочных коэффициентов и дальнейшей их корректировке, поскольку сами

по себе эти подходы не могут обеспечить требуемую точность и достоверность измерений.

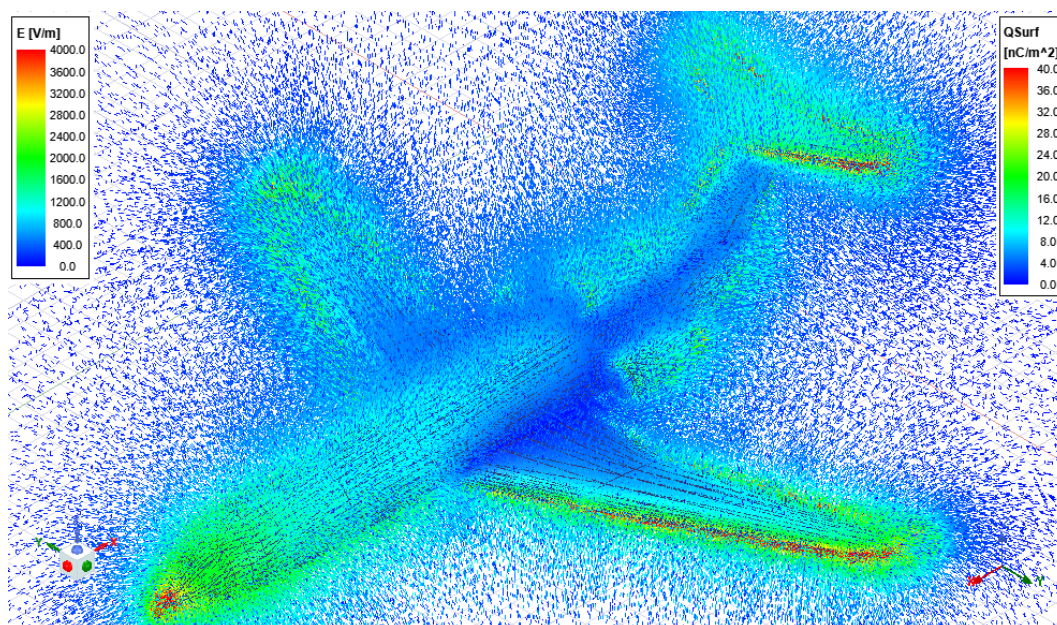


Рисунок 3 – Модель сильно заряженного самолета Як-42Д ($Q = 10^{-5}$ Кл) в условиях отсутствия внешнего электрического поля

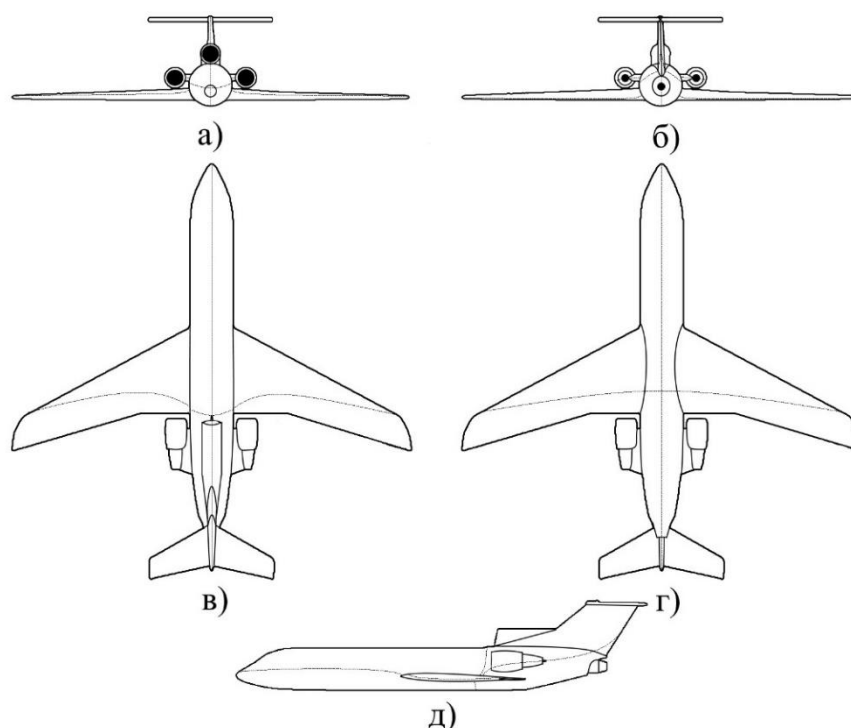


Рисунок 4 – Расположение электронейтралей на поверхности модели самолета Як-42Д: а) вид спереди, б) вид сзади, в) вид сверху, г) вид снизу, д) вид слева

В **третьей** главе проводится оценка возможности применения бесплотных летательных аппаратов для измерения напряженности электрического поля атмосферы.

Приведены особенности применения беспилотных летательных аппаратов и связанные с их использованием преимущества. Выполнен анализ результатов моделирования искажений электрических полей фюзеляжем и собственным зарядом БПЛА и сравнение с результатами моделирования пилотируемых самолетов, используемых в качестве самолетов-лабораторий. Проиллюстрирован процесс выбора оптимальной схемы расположения датчиков, измеряющих напряженность электрического поля, на борту БПЛА. Осуществлен расчет калибровочных коэффициентов датчиков.

Модель БПЛА, заряженного до величины $Q = 10^{-6}$ Кл, помещенная в свободную от внешнего электрического поля среду, изображена на рис. 5.

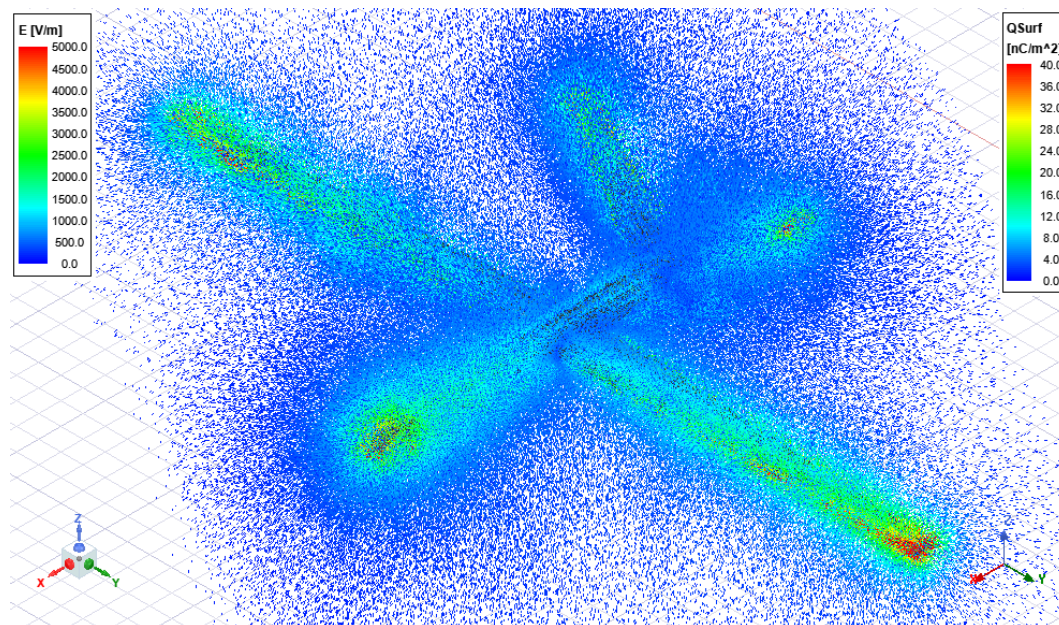


Рисунок 5 – Модель сильно заряженного БПЛА ($Q = 10^{-6}$ Кл) в условиях отсутствия внешнего электрического поля

Расположение электронеутралей на поверхности модели БПЛА, полученное в результате моделирования электрического поля, приведено на рис. 6.

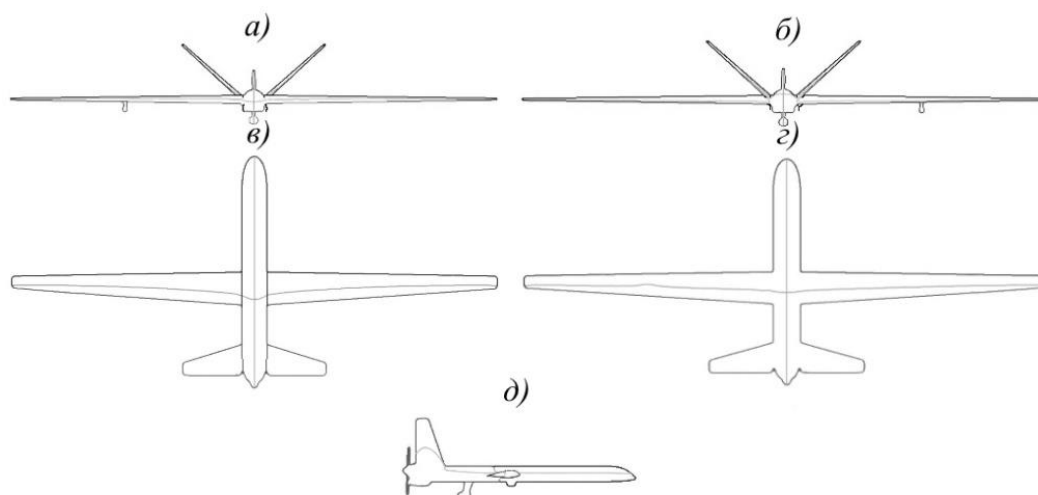


Рисунок 6 – Расположение электронеутралей на поверхности модели БПЛА: а) вид спереди, б) вид сзади, в) вид сверху, г) вид снизу, д) вид справа.

Сравнительный анализ результатов моделирования показал, что, несмотря на различия в размерах и материалах воздушных судов, максимумы и минимумы распределения поверхностных зарядов имеют схожий порядок величин и зависят в основном от особенностей общей и локальной геометрии поверхности, таких как удлинение фюзеляжа и крыла, радиусы закругления законцовок оперения и т.п., а изготовленные из современных композиционных материалов БПЛА могут быть использованы как самолеты-лаборатории в том числе и для измерения электрических полей в атмосфере.

Четвертая глава представляет собой исследование напряженности электрического поля и заряда самолета в облаках различных форм.

На протяжении многих лет ГГО им. А.И. Воейкова проводила самолетные исследования электрических полей в облаках. Для изучения облаков использовались самолеты-лаборатории Ил-14, Ан-12, Ту-104, Як-42Д и др. Часть полетов осуществлялась с заходом в облака, включая грозовые.

Измерение электрических полей осуществлялось с использованием приборов напряженности поля, разработанных в ГГО. На борту летательных аппаратов располагалось по четыре и более датчиков, позволяющих измерять вектор напряженности поля и заряд самолета.

Анализ данных летных экспериментов в диссертационной работе был выполнен на основе различных самолетных исследований электрических полей в облаках, проводившихся в разные годы.

Анализ данных летных экспериментов с использованием самолета-лаборатории Ил-14 по изучению характеристик конвективных облаков небольшой вертикальной мощности

Данные летных экспериментов с использованием самолета-лаборатории Ил-14 по изучению характеристик конвективных облаков небольшой вертикальной мощности были получены 19 июля 1984 г на северо-западе России (Ленинградская обл.). Была исследована гряда облаков *Cu cong* с верхней границей 3700 м и нижней границей 1500 м. Для проведения анализа использовались данные 19 проходов через 4 облака до их слияния и после. Всего было обработано 763 измерения.

Для измерения напряженности электрического поля использовался комплекс приборов ПНП, разработанных в ГГО, – электростатических флюксометров с вращающейся заземленной пластиной, периодически перекрывающей измерительную пластину прибора. Для расчета вертикальной компоненты напряженности электрического поля были использованы калибровочные коэффициенты, рассчитанные по методу компьютерного моделирования и показанные во второй главе работы.

Измерения температуры выполнялись с помощью ИК радиометра ИТ-3, влажность фиксировалась с помощью прибора ДИВО, скорости восходящих и нисходящих потоков измерялись с помощью ультразвукового анемометра БОРТ.

На рис. 7, 8 представлены гистограммы распределения вертикальной составляющей напряженности электрического поля и заряда самолета.

Наибольшая повторяемость значений напряженности поля находилась в диапазоне от минус 50 В/м до 0 В/м, а подавляющее большинство значений напряженности пришлось на диапазон от минус 250 В/м до 0 В/м. Наибольшая

повторяемость заряда летательного аппарата находилась в диапазоне от минус $4 \cdot 10^{-6}$ Кл до минус $2 \cdot 10^{-6}$ Кл, а подавляющее большинство значений заряда пришлось на диапазон от минус $6 \cdot 10^{-6}$ Кл до минус $2 \cdot 10^{-6}$ Кл.

Напряженность электрического поля в исследованных облаках в среднем составила минус 92 В/м при минимуме минус 320 В/м, среднее значение заряда самолета составило минус $4,1 \cdot 10^{-6}$ Кл при минимуме минус $9,9 \cdot 10^{-6}$ Кл, что соответствует данным предыдущих исследований.

Среднее значение заряда самолета было равно минус $4,1 \cdot 10^{-6}$ Кл при минимуме в минус $9,9 \cdot 10^{-6}$ Кл, что также соответствует данным предыдущих исследований.

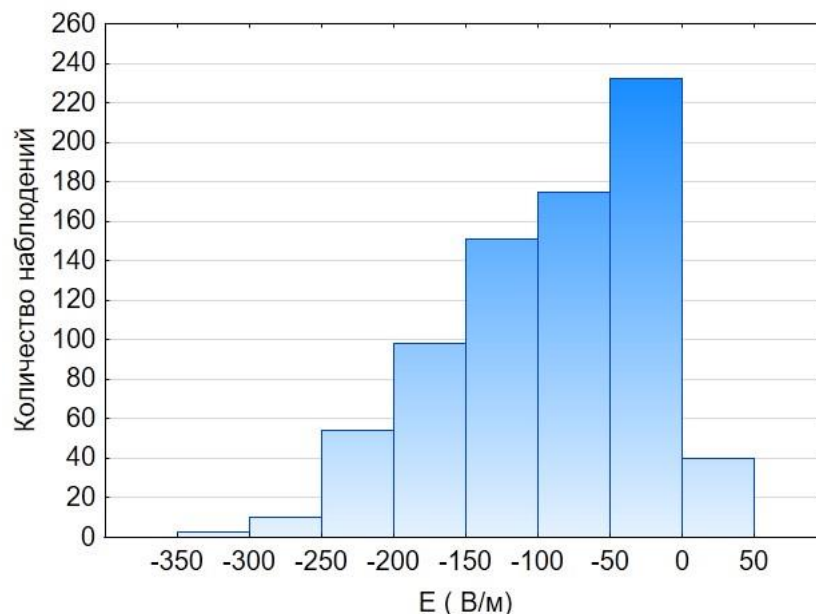


Рисунок 7 – Гистограмма распределения вертикальной составляющей напряженности электрического поля E

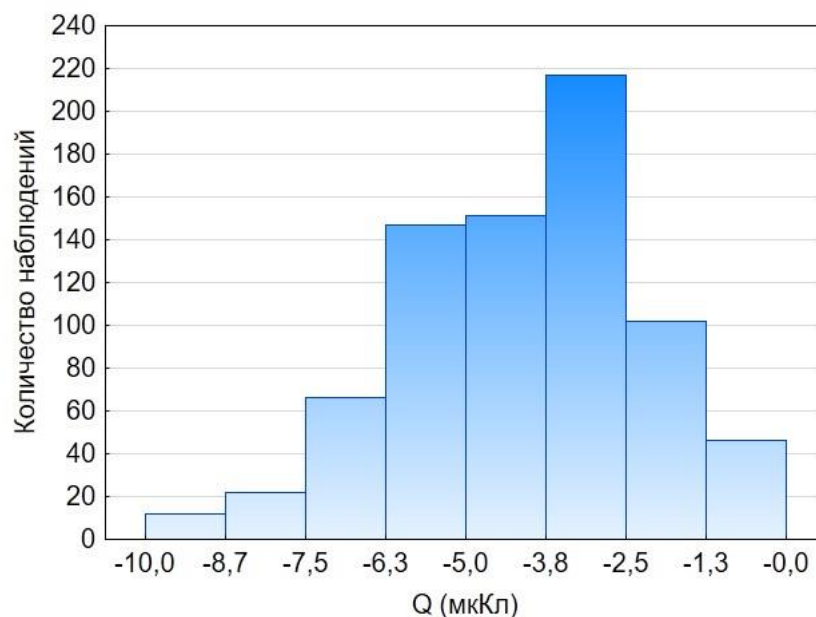


Рисунок 8 – Гистограмма распределения заряда самолета Q

Другие параметры, измеряемые самолетом-лабораторией, также подверглись исследованиям. Среднее значение водности равнялось $0,9 \text{ г/м}^3$ и менялось от облака к облаку в диапазоне от $0,7 \text{ г/м}^3$ до $1,1 \text{ г/м}^3$. Среднее значение скорости вертикальных потоков составило $5,4 \text{ м/с}$ и менялось в диапазоне от 3 м/с до $8,7 \text{ м/с}$. Среднее значение перегрева было равно $0,5^\circ\text{C}$ и изменялось в диапазоне от $0,1^\circ\text{C}$ до $0,7^\circ\text{C}$.

Для определения статистической взаимосвязи между измеряемыми характеристиками был выполнен расчет коэффициентов корреляции Спирмена.

Для исследованных облаков не были выявлены значимые корреляции напряженности электрического поля, заряда самолета со скоростью восходящих потоков и перегревом облака.

Была установлена тенденция к увеличению абсолютных величин напряженности электрического поля и заряда самолета с увеличением водности в облаке, что подтверждается современными исследованиями. Диаграммы рассеяния между этими параметрами приведены на рис. 9, 10.

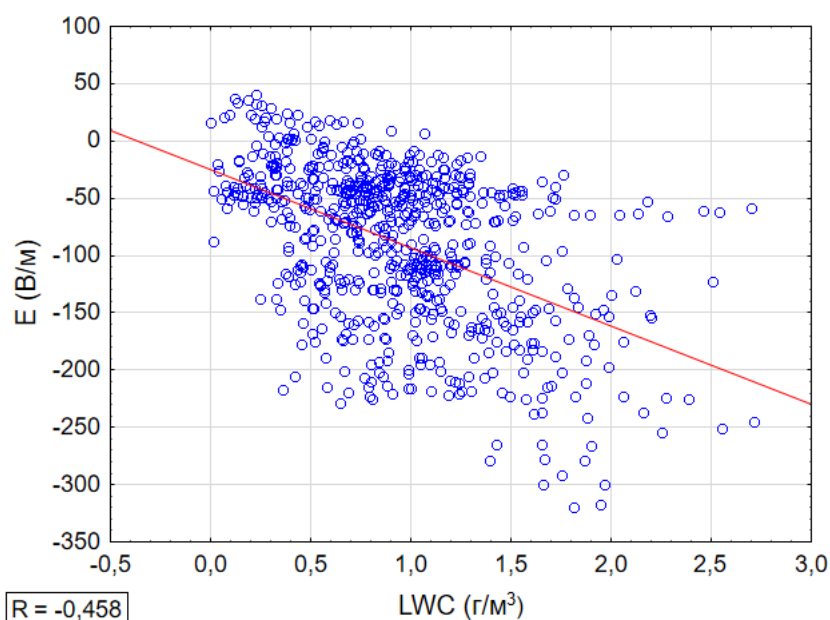


Рисунок 9 – Диаграмма рассеяния водности (LWC) и вертикальной составляющей напряженности электрического поля (E); $E = -24,74 - 68,26 \cdot LWC$

При увеличении водности выявлена тенденция к увеличению по модулю напряженности поля и заряда самолета. Коэффициенты корреляции составили величину минус $0,46$ и минус $0,47$ для напряженности поля и заряда соответственно.

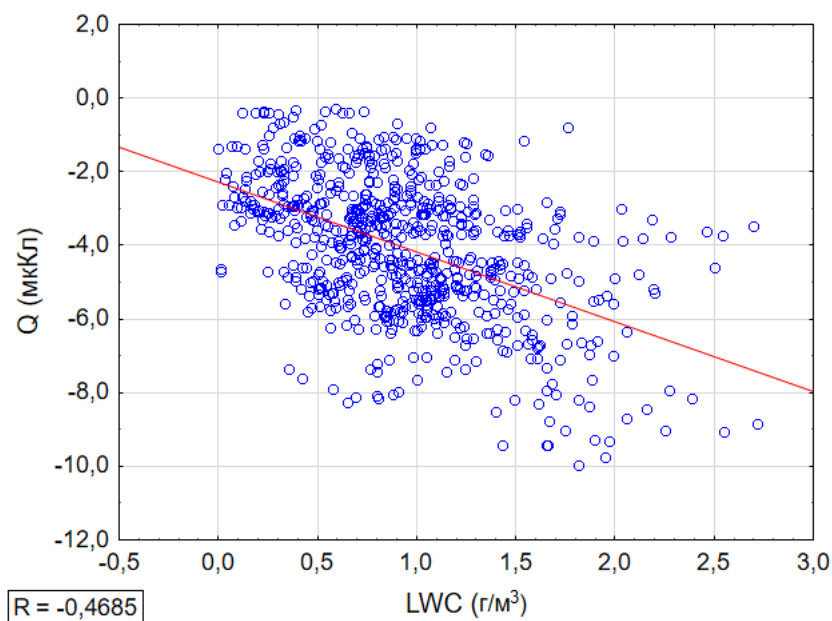


Рисунок 10 – Диаграмма рассеяния водности (LWC) и заряда самолета (Q);
 $Q = -2,3 \cdot 10^{-6} - 1,89 \cdot 10^{-6} \cdot LWC$

Следует отметить, что в литературе имеется довольно ограниченный объем данных об электрической структуре конвективных облаков небольшой и средней мощности, так как основное внимание исследователей традиционно сосредоточено на мощной кучевой и грозовой облачности. Полученные значения вертикальной составляющей напряженности электрического поля соответствуют представлениям, согласно которым напряженность поля в облаке может быть как положительной, так и отрицательной. Данные о величинах и повторяемости вертикальной составляющей напряженности электрического поля и заряда летательного аппарата в конвективных облаках, полученные с использованием калибровочных коэффициентов, рассчитанных по представленной автором методике, дополняют данные предыдущих исследований и не противоречат им.

Обобщение результатов измерений напряженности электрического поля и зарядов летательного аппарата в конвективных облаках в период с 1961 г по 1990 г

В ходе выполнения ГГО им. А.И. Воейкова в 2018 г НИР «Предоставление информационно-аналитических данных по структурам электрических полей облаков» было отобрано и обработано большое количество экспериментальных данных исследований электрических структур облаков, проводившихся при помощи самолетов-лабораторий Ил-14, Ту-104, Ан-12 в период с 1961 г по 1990 г. Осуществлена оцифровка лент самописцев самолетов-лабораторий старых типов. Проведены расчеты составляющих электрического поля и заряда самолета. Выполнена статистическая обработка данных. При обработке данных, полученных при помощи самолета-лаборатории Ил-14, были использованы калибровочные коэффициенты, полученные методом компьютерного моделирования.

Суммарный объем рассмотренных данных по полетам в конвективных облаках составляет 321 км полета в 26 облаках. Было обработано 3060 измерений.

Для проведения анализа электрических характеристик конвективных облаков была проведена статистическая обработка данных. Были определены

средние значения и максимумы напряженности поля и заряда самолета. Данные сгруппированы по типам облаков.

В 6 случаях заряд самолета был положительным, в 20 случаях – отрицательным. В 80 % случаев средняя напряженность электрического поля не превышала 10000 В/м. Максимальное зарегистрированное значение напряженности поля при этом составило 87758 В/м. Максимальный заряд – $22785 \text{ Кл} \cdot 10^{-7}$. Диаграммы размаха средних значений напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках различных форм представлены на рис. 11, 12.

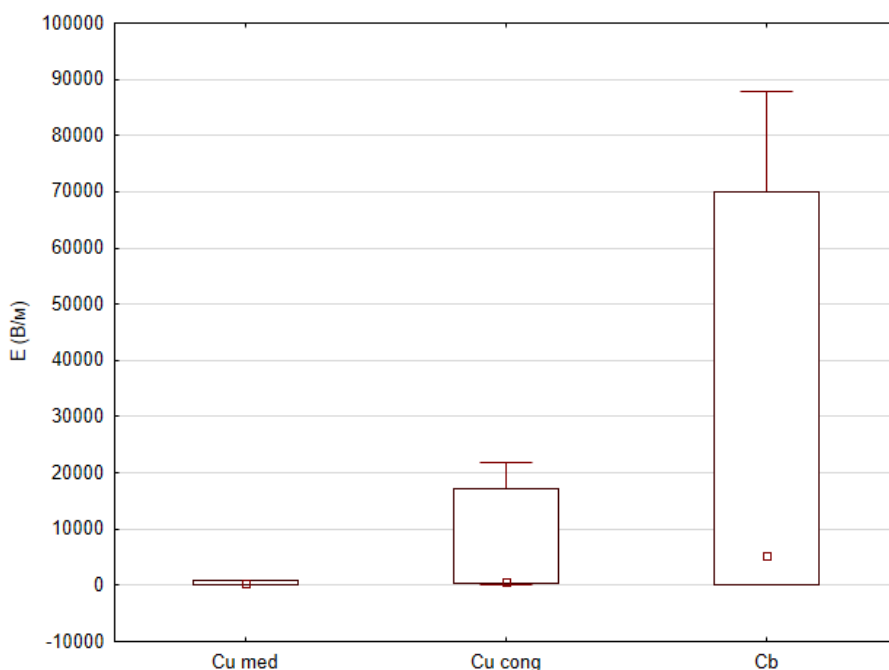


Рисунок 11 – Диаграмма размаха средних значений напряженности электрического поля в конвективных облаках различных форм

В облаках Cb наибольшая повторяемость значений модуля вектора напряженности электрического поля находилась в диапазоне от 0 В/м до 3500 В/м, наибольшая повторяемость заряда – в диапазоне от минус $100 \cdot 10^{-7}$ Кл до $200 \cdot 10^{-7}$ Кл.

В облаках Cu cong наибольшая повторяемость значений модуля вектора напряженности электрического поля находилась в диапазоне от 0 В/м до 800 В/м, наибольшая повторяемость заряда – в диапазоне от минус $300 \cdot 10^{-7}$ Кл до минус $250 \cdot 10^{-7}$ Кл.

В облаках Cu med средние значения модуля вектора напряженности электрического поля принимали значения от 220 В/м до 644 В/м, заряда – от минус $166 \cdot 10^{-7}$ Кл до минус $219 \cdot 10^{-7}$ Кл.

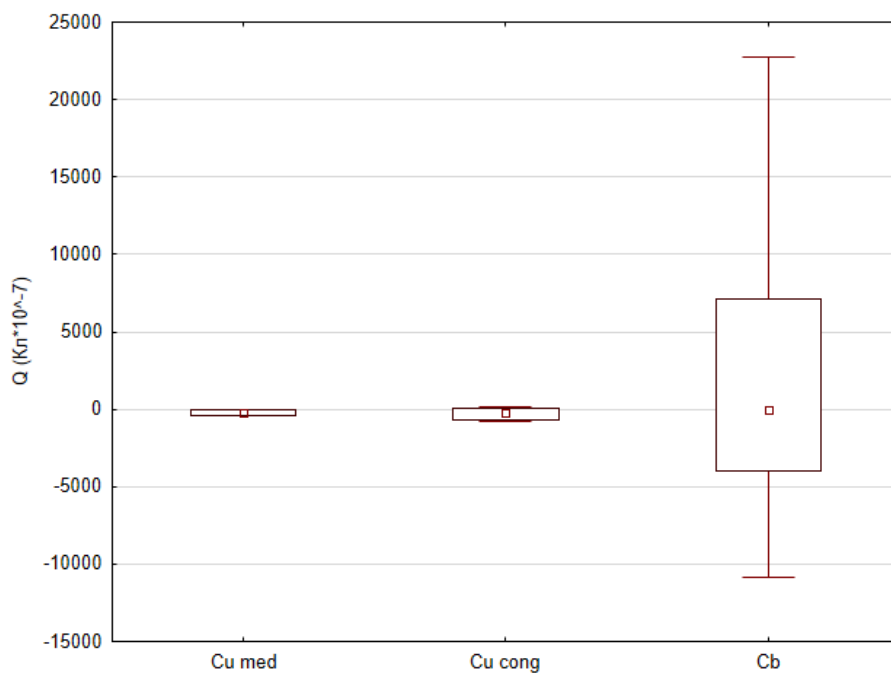


Рисунок 12 – Диаграмма размаха средних значений заряда самолета в конвективных облаках различных форм

В облаках Cb среднее значение напряженности электрического поля составило 11467 В/м при максимуме 87758 В/м, в облаках Cu cong – 1698 В/м при максимуме 21805 В/м, в облаках Cu med – 463 В/м при максимуме 827 В/м.

В облаках Cb соотношение вертикальной и горизонтальной составляющих вектора напряженности электрического поля составило 0,88, в облаках Cu cong – 0,37, в облаках Cu med – 0,22.

Полученные в работе результаты не противоречат данным предыдущих исследований и могут служить дополнением к ним.

Анализ данных летного эксперимента самолета-лаборатории Як-42Д в высокослоистых и перисто-слоистых облаках

Далее в работе представлены результаты исследований высокослоистых и перисто-слоистых облаков при помощи атмосферно-электрического комплекса действующего самолета-метеолаборатории Як-42Д «Росгидромет» 19 июня 2014 г в ходе выполнения полета по маршруту Москва – Нарьян-Мар.

Измерения проводились в высокослоистых и перисто-слоистых облаках на протяжении 473,8 км во время выполнения двух режимов полета. Всего было обработано 2369 измерений.

Измерения напряженности поля выполнялись при помощи шести датчиков напряженности электрического поля ПНП-011 из состава аппаратно-программного комплекса АПК-7 для измерения электрических характеристик атмосферы. Для расчета напряженности электрического поля и заряда самолета по данным датчиков напряженности поля были использованы калибровочные коэффициенты, рассчитанные при помощи метода компьютерного моделирования и перечисленные в главе 2 диссертационной работы.

Измерения температуры выполнялись при помощи датчиков температуры из состава аппаратно-программного комплекса АПК-1.

Для проведения анализа была проведена статистическая обработка данных. Диаграммы размаха средних значений напряженности электрического поля и заряда самолета представлены на рис. 13, 14.

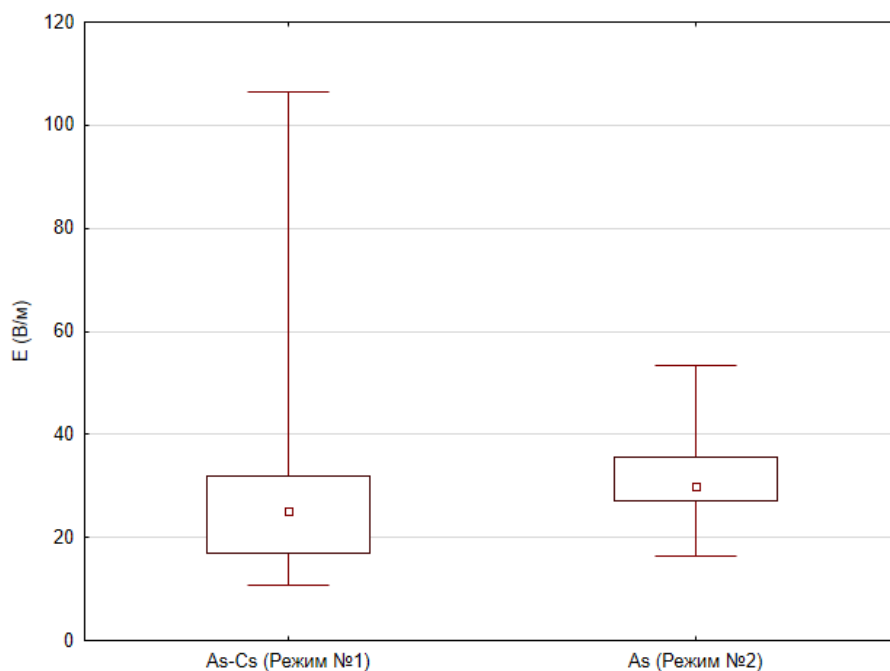


Рисунок 13 – Диаграмма размаха средних значений напряженности электрического поля в высокослоистых и перисто-слоистых облаках

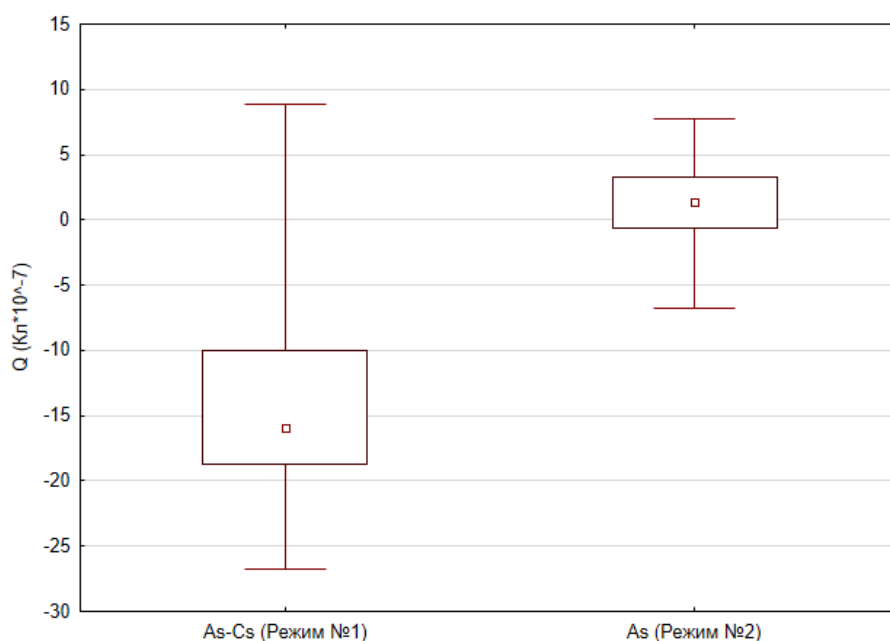


Рисунок 14 – Диаграмма размаха средних значений заряда самолета в высокослоистых и перисто-слоистых облаках

Минимальное значение продольной компоненты напряженности поля в ходе всего эксперимента составило минус 21,5 В/м, а максимальное значение 21,8 В/м. Среднее значение было равно 1 В/м. Минимальное значение вертикальной компоненты напряженности поля в ходе всего эксперимента составило минус 55,3 В/м, а максимальное значение 91,2 В/м. Среднее значение было равно 13,6 В/м.

Минимальное значение боковой компоненты напряженности поля в ходе всего эксперимента составило минус 61,3 В/м, а максимальное значение 43,1 В/м. Среднее значение было равно 8,6 В/м.

Минимальное значение модуля вектора напряженности поля в ходе всего эксперимента составило 10,7 В/м, а максимальное значение 106,5 В/м. Среднее значение было равно 26,8 В/м. Наибольший заряд самолета составил минус $8,8 \cdot 10^{-7}$ Кл, а наименьший – минус $26,7 \cdot 10^{-7}$ Кл. Среднее значение заряда было равно минус $11,3 \cdot 10^{-7}$ Кл.

Величина напряженности электрического поля в облаках As-Cs (Режим №1) в среднем составила 25,8 В/м при максимуме 106,5 В/м. Величина напряженности электрического поля в облаках As (Режим №2) в среднем составила 32 В/м при максимуме 53,4 В/м. Среднее значение заряда самолета в облаках As-Cs (Режим №1) было равно минус $13,6 \cdot 10^{-7}$ Кл при минимуме минус $26,7 \cdot 10^{-7}$ Кл. Среднее значение заряда самолета в облаках As (Режим №2) было равно $1,2 \cdot 10^{-7}$ Кл при максимуме $7,7 \cdot 10^{-7}$ Кл. Полученные вновь значения находятся в соответствии с опубликованными ранее данными.

Масштаб неоднородности электрического поля для облаков As-Cs (Режим №1) составил 12 км, для облаков As (Режим №2) – 4,4 км.

Значимая корреляция между всеми исследованными величинами отсутствовала. В облаках As в одном из экспериментов обнаружена очень слабая корреляция напряженности электрического поля и заряда самолета с температурой окружающего воздуха. Диаграммы рассеяния между этими параметрами приведены на рис. 15, 16.

Коэффициенты корреляции составили соответственно минус 0,28 для напряженности поля и 0,41 для заряда самолета.

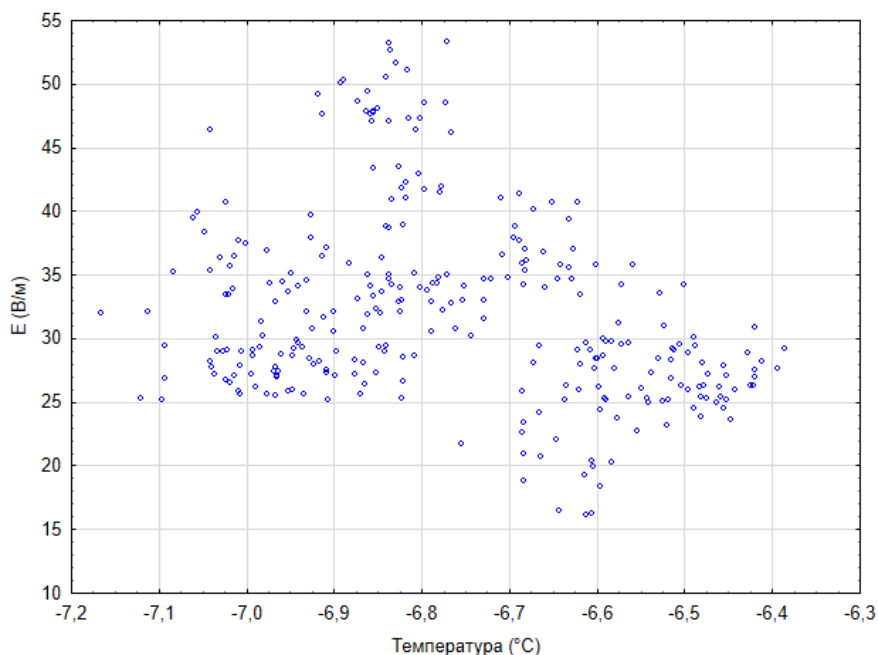


Рисунок 15 – Диаграмма рассеяния напряженности электрического поля и температуры воздуха в облаках As (Режим №2)

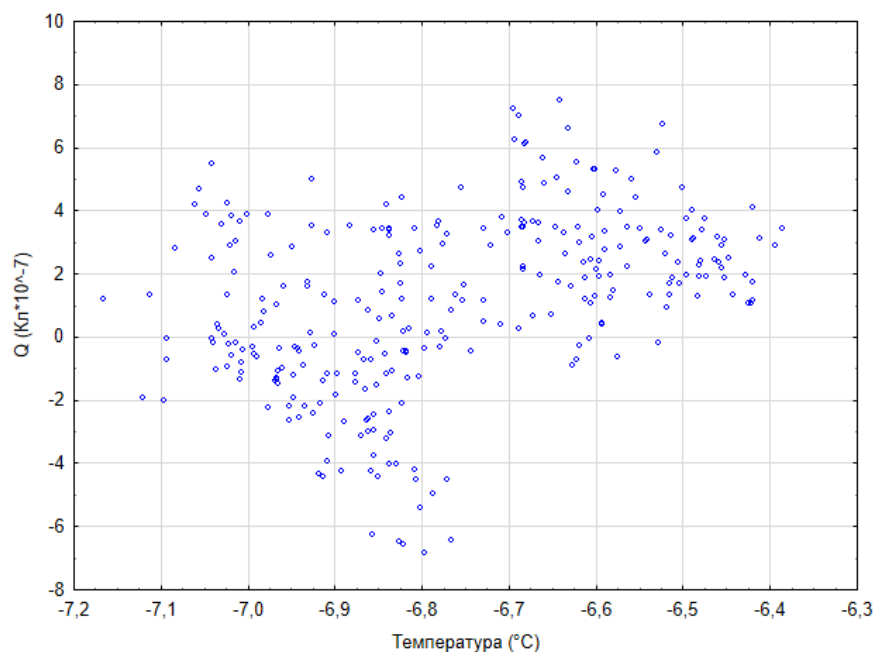


Рисунок 16 – Диаграмма рассеяния заряда самолета и температуры воздуха в облаках As (Режим №2)

В заключении приведены основные результаты работы.

Впервые разработана методика компьютерного математического моделирования самолетов-лабораторий, позволяющая определить положения электрических нейтралей на поверхности самолета, выработать рекомендации по расположению датчиков для измерения напряженности электрического поля, получить значения калибровочных коэффициентов для этих датчиков.

Наиболее подходящим способом для исследования электрических полей с целью понимания физических процессов, происходящих в атмосфере и в облаках, является использование специализированных самолетов-лабораторий. Для обеспечения измерений на борту самолета электрических полей атмосферы и собственного заряда летательного аппарата необходимо использовать системы измерителей, состоящие из нескольких электростатических флюксометров. Наиболее перспективным методом калибровки измерительной системы является компьютерное моделирование – менее затратный и трудоемкий метод, имеющий существенное преимущество в точности определения калибровочных коэффициентов перед масштабным моделированием.

В работе выполнен анализ методов измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда самолета, приведена математическая модель для расчета заряда летательного аппарата и электрических полей, создаваемых летательным аппаратом, разработана методика измерений напряженности электрического поля и заряда летательного аппарата с использованием компьютерного моделирования, выполнена оценка точностных характеристик измерений напряженности электрического поля. Показано, что при существующих методах калибровки измерителей систематические погрешности определения коэффициентов искажения поля формой самолета и его зарядом могут приводить к существенным погрешностям измерения напряженности электрического поля и заряда.

В целях решения задачи вычисления матриц калибровочных коэффициентов были разработаны трехмерные модели летательных аппаратов. Компьютерное моделирование позволяет при заданных начальных условиях определять не только наведенное зарядом самолета электростатическое поле, но и сам заряд.

Разработанная методика применена для расчета калибровочных характеристик самолетных измерителей для самолетов Ил-14, Як-42Д, беспилотного летательного аппарата среднего класса.

Исследована возможность применения БпЛА в качестве самолета-лаборатории для исследования электрических полей атмосферы. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования искажений электрического поля пилотируемыми и беспилотными самолетами. Приведены примеры выбора схемы расположения приборов напряженности поля на борту БпЛА, расчета их калибровочных матриц.

Калибровочные коэффициенты, полученные методом компьютерного моделирования, были использованы при обработке данных, полученных при помощи самолета-лаборатории Ил-14 в ходе выполнения ГГО им. А.И. Воейкова в 2018 г НИР «Предоставление информационно-аналитических данных по структурам электрических полей облаков».

Выполнен детальный анализ данных о конвективных облаках небольшой вертикальной мощности, полученных при помощи самолета-лаборатории Ил-14 19 июля 1984 г. Было обработано 763 измерения. Величина напряженности электрического поля в среднем составила минус 92 В/м при минимуме минус 320 В/м. Среднее значение заряда самолета составило минус $4,1 \cdot 10^{-6}$ Кл при минимуме в минус $9,9 \cdot 10^{-6}$ Кл.

Выявлена тенденция к увеличению по модулю величин напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках с увеличением водности.

Проведена обработка и анализ данных по 26 конвективным облакам, полученных в ходе летных работ, проводившихся при помощи самолетов-лабораторий Ил-14, Ту-104, Ан-12 в период с 1961 г по 1990 г. Было обработано 3060 измерений. Среднее значение напряженности электрического поля в облаках Сб составило 11467 В/м при максимуме 87758 В/м, в облаках Cu cong – 1698 В/м при максимуме 21805 В/м, в облаках Cu med – 463 В/м при максимуме 827 В/м.

Представлены результаты анализа данных летного эксперимента самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» в высокослоистых и перисто-слоистых облаках. Измерения напряженности электрического поля проводились 19 июня 2014 г на протяжении 473,8 км. Всего было обработано 2369 измерений. Величина напряженности электрического поля в облаках As-Cs в среднем составила 25,8 В/м при максимуме 106,5 В/м. Величина напряженности электрического поля в облаках As в среднем составила 32 В/м при максимуме 53,4 В/м.

Среднее значение заряда самолета в облаках As-Cs было равно минус $13,6 \cdot 10^{-7}$ Кл при минимуме минус $26,7 \cdot 10^{-7}$ Кл. Среднее значение заряда самолета в облаках As было равно $1,2 \cdot 10^{-7}$ Кл при максимуме $7,7 \cdot 10^{-7}$ Кл.

В облаках As в одном из экспериментов выявлена слабая корреляция напряженности электрического поля и заряда самолета с температурой окружающего воздуха.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных исследований:

1. Торгунаков Р.Е., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А. О методике измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда летательного аппарата // Труды ГГО. – 2015. – Вып. 579. – С. 214-231.

2. Торгунаков Р.Е., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А. Самолетные исследования напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках на ранней стадии развития // Труды ГГО. – 2017. – Вып. 587. – С. 32-46.

3. Торгунаков Р.Е. О возможности применения беспилотных летательных аппаратов для исследований напряженности электрических полей в атмосфере // Труды ГГО. – 2018. – Вып. 588. – С. 37-46.

4. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Куров А.Б., Тарабукин И.А., Веремей Н.Е., Дмитриева О.А., Торгунаков Р.Е., Торопова М.Л. Характеристики конвективных облаков Северо-Запада России, формирующих интенсивные осадки // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – № 36. – С. 662-669.

Публикации в других изданиях:

5. Акселевич В.И., Торгунаков Р.Е. Летательные аппараты и статическое электричество // МЕТЕОСПЕКТР. – 2013. – № 2 – С. 105-111.

6. Торгунаков Р.Е., Синькевич А.А., Михайловский Ю.П. Погрешности самолетного метода контроля электрического состояния облаков. // Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2017). Тезисы. – СПб., 2017. – С. 66-67.

7. Торгунаков Р.Е., Синькевич А.А., Михайловский Ю.П. О самолетных измерениях напряженности электрического поля для контроля токов ГАЭЦ // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы. Тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых – Ярославль: Филигрань, 2017. – С. 21-22.

8. Торгунаков Р.Е., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А. Совершенствование самолетной методики измерения напряженности электрического поля и заряда самолета для решения задач комплексных исследований облаков // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. – Нальчик: ВГИ, 2017. – С. 205-212.

9. Торгунаков Р.Е., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А. О некоторых результатах самолетных исследований электрических и других характеристик конвективных облаков // V Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»: материалы конференции. Часть 2. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – С. 134-137.