

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной и инновационной
деятельности Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук, профессор



Ворожцов Александр Борисович

«*Акс*» сентября 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский Томский государственный университет» –
на диссертацию **Торгунакова Романа Евгеньевича**

«Разработка и исследование методов измерения электрических полей атмосферы
при помощи летательных аппаратов и их применение при анализе данных
контроля электрического состояния облаков» на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.6.18. Науки об атмосфере и климате

Актуальность работы.

Электрическое состояние атмосферы может сильно варьироваться из-за различных природных и антропогенных факторов, поэтому для изучения функционирования глобальной электрической цепи необходим мониторинг и анализ изменчивости электрических величин в различных регионах Земли.

Высокая чувствительность приземного электрического поля к локальным условиям может быть использована для решения обратной задачи – получение информации о состоянии атмосферы и происходящих в ней процессах на основе их отклика в электрическом поле, для реализации которой также необходимо получение надежных оценок изменчивости электрического поля в конкретном пункте.

Актуальность темы исследования заключается и в том, что используемые многими авторами методы калибровки бортовых измерителей обладают существенными недостатками, трудно реализуемы на практике или не обеспечивают необходимую точность.

Получение новых данных о напряженности электрического поля в облаках разных типов, полученных при помощи новой методики, позволит улучшить

понимание фундаментальных физических процессов, протекающих в свободной атмосфере и в облаках.

Цель работы: совершенствование существующих методов измерений электрических полей в атмосфере с помощью бортовых измерителей для уменьшения погрешностей измерений с бортов летательных аппаратов 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, высокослоистых и перисто-слоистых облаках при помощи разработанной методики;
- исследование неоднородностей электрических структур облаков.

Объектом являются электрическое поле в атмосфере и заряды летательных аппаратов.

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

Научная новизна:

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 5 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.

Значимость результатов, полученных автором диссертационной работы, для науки и практики.

Полученные результаты имеют существенное теоретическое и прикладное значение. Рассматриваемые в анализируемой работе вопросы имеют особую актуальность при конструировании оборудования 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.

Предложенная автором диссертации методика измерения электрических полей атмосферы позволит существенно повысить точность и чувствительность измерений, получать надежные и достоверные данные об электрических полях атмосферы, о неоднородностях электрической структуры облаков различных форм. Результаты анализируемых в диссертации исследований позволят сократить число специальных полетов, требующихся для дополнительной калибровки измерительной системы.

Степень достоверности результатов исследования.

Достоверность полученных результатов обеспечивается качеством и большим объемом проанализированных фактических данных, тщательным анализом предшествующих научных работ в области измерений напряженности электрического поля атмосферы. Полученные результаты не противоречат результатам других предшествующих исследований по данной тематике и

существующим представлениям о физических характеристиках атмосферы и облаков.

Личный вклад автора.

Личный вклад автора заключается в участии в формировании цели и задач диссертации, в составлении плана и программы исследования, выборе методов исследований. Автор разработал предлагаемую в работе методику, принимал участие в подготовке и обработке исходных материалов, провел анализ и обобщение полученных результатов.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемых источников. Общий объем работы составляет 138 страниц, работа иллюстрирована 78 рисунками и 24 таблицами. Список используемых источников содержит 116 наименований.

Анализ содержания работы.

Во Введении приведены общие сведения о диссертации, ее актуальности, цели, задачах, материалах исследования, научной новизне и практической значимости результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены данные об источниках и причинах появления сильных электрических полей в атмосфере, а также обзор методов исследования электрических характеристик атмосферы. Выделено мнение, что особенно сильные процессы электризации облачных частиц и гидрометеоров, приводящие к разделению зарядов, образованию заряженных областей, формированию электрической структуры с напряженностью поля, достаточной для образования грозových разрядов, происходят в кучево-дождевых облаках. В заключение первой главы приведен обзор используемых методов измерения электрических полей при помощи летательных аппаратов: аэростатов, планеров и самолетов.

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.

В третьей главе проведена 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.

В четвертой главе представляет собой исследование напряженности электрического поля и заряда самолета в облаках различных форм. Приведен анализ данных летных экспериментов с использованием самолета лаборатории Ил-14 по изучению характеристик конвективных облаков небольшой вертикальной мощности. Сделано обобщение результатов измерений напряженности электрического поля и зарядов летательного аппарата в конвективных облаках в период с 1961 г по 1990 г. Представлен анализ данных летного эксперимента самолета-лаборатории Як-42Д в высокослоистых и перисто-слоистых облаках.

В заключении приведены выводы, в которых перечислены наиболее важные результаты, полученные автором диссертационной работы.

Замечания по тексту диссертации, автореферату и их оформлению.

Диссертация, в целом, написана грамотно, отличается логичностью и последовательностью изложения. Полученные результаты соответствуют поставленным целям. Содержание диссертации изложено в логически последовательной форме, стиль изложения научный и достаточно ясный. Исходные экспериментальные материалы и методические приемы надежны, иллюстрации выполнены на удовлетворительном уровне. Все это создает общее положительное впечатление о проделанной работе. Однако имеется ряд замечаний.

Замечания по работе:

1. В защищаемых положениях отсутствуют количественные оценки анализируемых параметров (например напряженности электрического поля, заряда летательного аппарата).

2. Формулировка Второго защищаемого положения является не совсем удачной – не сказано, на основе чего сделан данный вывод, чем он подтверждается.

3. В тексте диссертации не объясняется, почему (на основании каких побуждений) в модельных расчетах в качестве значения напряженности внешнего электрического поля было выбрано 1000 В/м.

4. В главе 4.2 на гистограммах не вполне удачно подобрана ширина карманов анализируемых величин – ширина не постоянна для одних и тех же величин (осложняет сравнение рисунков), на некоторых рисунках она является чрезмерно маленькой (вместо сглаженного распределения наблюдаются отдельные «иглы»).

5. В диссертации недостаточно отражено, являются ли найденные автором корреляции напряженности электрического поля и заряда самолета с водностью в конвективных облаках и с температурой окружающего воздуха в облаках As универсальными закономерностями, и почему такие «слабые» и «небольшие», по словам самого автора, корреляции вынесены в защищаемые положения. Не показано, являются ли статистически значимыми полученные коэффициенты корреляции. Причем, связь с температурой окружающего воздуха найдена только для облаков As, что не отражено в защищаемом положении.

6. В заключении не хватает обобщения полученных результатов: «Таким образом, ...» и поместить туда либо рекомендации по месту установки прибора, либо рекомендации по поведению летательного аппарата, учитывая различия в значениях электрических характеристик по телу аппарата, либо еще какие-то рекомендации.

Замечания к оформлению текста диссертации:

1. Рисунки 73 и 74 являются полными копиями рисунков 51 и 52, хотя подрисуночные подписи разные.

2. В тексте диссертации имеются пунктуационные ошибки (например, во многих местах используется знак препинания «дефис» вместо знака препинания «тире»).

3. Применяется нестандартное написание значений величин и единиц измерений (например, в главах 2.4 и 2.5 есть запись $150 \text{ Кл} \cdot 10^{-9} / \text{м}^2$ и подобные). Обычно, сперва пишется мантисса числа, затем порядок числа, а затем единица измерения (например, $150 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^2$).

4. В главе 4.3 чрезмерное количество подряд идущих рисунков (7 страниц с рисунками без текста), которые слабо описаны в тексте. Их имело бы смысл «разбавить» текстом или перенести в Приложение.

5. Список сокращения и условных обозначений находится в конце диссертации, хотя, обычно, его помещают вначале (читатель замечает его в последний момент, хотя он необходим в процессе чтения диссертации).

6. С. 116, рис. 73, 74 – В названии рисунка указана «Диаграмма размаха средних значений напряженности электрического поля в As и Cs», а на рисунке по оси X указаны облака Cu med, Cu cong, Cb.

7. Блок-схемы на рис. 6 оформлена не совсем правильно: нет блока начала и окончания алгоритма, неправильно оформлены блоки ввода/вывода.

Отмеченные замечания не снижают высокого научного уровня изложенной работы, а полученные результаты работы дают основания для ее положительной оценки.

Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате. **Текст автореферата диссертации полностью соответствует содержанию диссертации.**

Апробация работы.

Научные статьи автора прошли апробацию на научных и научно-практических конференциях соответствующего уровня и профиля. Основные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, были представлены на конференциях всероссийского и международного уровня, на научных семинарах отдела физики облаков и атмосферного электричества ФГБУ «ГГО», на заседании научно-технического совета АО «КТ-Беспилотные Системы». Основные результаты опубликованы и в тематических научных изданиях, в том числе в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, соответствуют содержанию диссертации и отражают защищаемые положения. Безусловным достоинством работы является то, что разработанная автором методика внедрена а полученные на ее основе калибровочные коэффициенты использованы в ходе выполнения НИР «Предоставление информационно-аналитических данных по структурам электрических полей облаков», выполненной в ГГО им. А.И. Воейкова. 2018 г.

Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертация оформлена в соответствии с установленными требованиями, ссылки на используемые источники оформлены корректно. При выполнении диссертационного исследования автором использован достаточный и достоверный фактический материал, показано владение традиционными географическими методами, методами математической статистики и моделирования. Торгунаков Р. Е., является сформировавшимся исследователем, способным решать актуальные задачи из области физики атмосферы.

Диссертация соответствует научной специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате (физико-математические науки) по направлению исследований «Градиент потенциала. Грозное электричество. Технологии мониторинга электрических процессов в атмосфере» (п. 7 паспорта специальности).

Таким образом, диссертация **Торгунакова Романа Евгеньевича** является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи изучения функционирования глобальной электрической цепи, имеющей значение для развития знаний в области атмосферного электричества, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв на диссертацию Р. Е. Торгунакова обсужден и одобрен на заседании кафедры метеорологии и климатологии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета 29 августа 2024 г., протокол № 153.

Доцент кафедры метеорологии и климатологии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (634050, г. Томск, Ленина пр., 36, (3822) 52-98-52, rector@tsu.ru, www.tsu.ru), кандидат физико-математических наук (25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы)

Нечепуренко Ольга Евгеньевна

«29» августа 2024 г.

Подпись удостоверено

СПЕЦИАЛИСТ ПО КАДРАМ
ОТДЕЛА КАДРОВ
Е. Г. ПЛОТНИКОВА

29.08.2024

