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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук Синькевич Андрей Александрович

Санкт-Петербург – 2024

### ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение
Глава 1. Методы исследования электрических характеристик атмосферы 13
1.1. Источники и причины появления сильных электрических полей в атмосфере
1.2. Методы измерений электрических полей в атмосфере 18
1.3. Механизмы заряжения самолетов в облаках и осадках
1.4. Методы измерения электрических полей с летательных аппаратов,
погрешности измерений
Выводы к главе 1
Глава 2. Описание методики измерения напряженности электрического поля и
заряда летательного аппарата 32
2.1. Модель измерений напряженности электрического поля и заряда
летательного аппарата 32
2.2. Оценка зависимости погрешности измерений напряженности
электрического поля от точности измерительной аппаратуры
2.3. Обобщенный алгоритм и методика измерения напряженности
электрического поля и заряда летательного аппарата 41
2.4. Результаты моделирования и расчет калибровочных коэффициентов
самолета Ил-14
2.5. Результаты моделирования и расчет калибровочных коэффициентов
самолета Як-42Д 57
Выводы к главе 265
Глава 3. Оценка возможности применения перспективных беспилотных
летательных аппаратов самолетного типа средней дальности для исследований

3.1. Особенности использования беспилотных летательных аппаратов для
исследований атмосферного электричества
3.2. Результаты моделирования и расчет калибровочных коэффициентов
БпЛА
3.3. Сравнение результатов моделирования самолетов разных типов76
Выводы к главе 378
Глава 4. Исследование напряженности электрического поля и заряда самолета в
облаках различных форм79
4.1. Анализ данных летных экспериментов по изучению характеристик
конвективных облаков небольшой вертикальной мощности с
использованием самолета-лаборатории Ил-14 79
4.2. Обобщение результатов измерений напряженности электрического поля
и заряда летательного аппарата в конвективных облаках в период с 1961 г по
1990 г91
4.3. Анализ данных летного эксперимента самолета-лаборатории Як-42Д в
высокослоистых и перисто-слоистых облаках 105
Выводы к главе 4120
Заключение
Список сокращения и условных обозначений 125
Список используемых источников 126

#### Введение

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.

Электрическое поле атмосферы формируется электрическими зарядами, расположенными на земле и в атмосфере. Электрические заряды атмосферы следствие процессов возникают как ионизации воздуха И разделения разноименных электрических зарядов. Ионизация воздуха в основном происходит действием ультрафиолетовой радиации под космического излучения, ионизирующей радиации радиоактивных пород земли, электрических разрядов в атмосфере и т. д. Причиной разделения положительных и отрицательных зарядов возникновению атмосферных электрических полей являются И многие атмосферные процессы, такие как образование облаков, осадки, конвекция и др.

Исследования атмосферного электричества позволяют выяснить роль электрических сил в процессах образовании облаков и осадков; выяснить природу существования глобальной атмосферной электрической цепи и процессов, ведущих к электризации облаков; снизить опасность для хозяйственной деятельности человека.

Гроза, сопровождающие ее разряды молний и электромагнитное излучение являются крайне опасными явлениями природы, которые могут привести к лесным пожарам, повреждению инфраструктурных объектов, возникновению аварийных ситуаций на воздушном, водном и других видах транспорта [27]. При изучении гроз большой интерес представляют как циркуляционные процессы атмосферы, способствующие возникновению гроз [14], так и влияние географических факторов климата, формирующих пространственное распределение грозовой активности [13]. В настоящее время сильный импульс к развитию с целью краткосрочного прогнозирования гроз и изучения физических явлений, возникающих в атмосфере,

получили наблюдения за атмосферным электричеством, которые основываются, например, на измерении напряженности электрического поля, на радиопеленгации [28, 41, 49], на использовании данных спутникового зондирования [48].

Эксперименты по контролю электрического состояния облаков начали проводиться еще в XVIII в. Более детальные измерения напряженности электрического поля и других характеристик атмосферы стали возможны с развитием авиационной техники, для измерения электрических характеристик атмосферы широко используются специализированные самолеты-лаборатории [18, 21, 23, 32, 44, 45, 56, 65, 68, 74, 86, 87, 88, 104].

С помощью самолетов можно проводить исследования и в кучевых, и в кучево-дождевых облаках. Использование специализированных самолетовлабораторий для исследования электрических полей атмосферы также позволяет проводить и другие параллельные исследования, связанные, например, с электрическим климатом Земли, взаимосвязями электрических процессов в тропосфере и ионосфере и другими проблемами физики атмосферы [53].

Исследование электрических полей атмосферы при помощи самолетов является непростой задачей. Самолет очень сильно искажает электрическое поле собственным наведенным зарядом. Величина напряженности поля, наведенного зарядом, может на порядки превосходить исследуемую величину напряженности поля атмосферы. При измерении электрических полей при помощи самолетов перед исследователями в первую очередь стоит задача определения коэффициентов искажения поля – коэффициентов формы [53].

Большой вклад в разработку и совершенствование методов измерения напряженности электрических полей с помощью самолетов, особенно в недавнее время, внесли как зарубежные, так и российские ученые, такие как Koshak W.J. [86], Mach D.M. [93], Christian H.J., Stewart M.F., Bateman M.G. [87], Dye J.E., Lewis S. [74], Winn W.P. [115], Laroche P. [88], Blakeslee R.J., Christian H.J., Vonnegut B. [68], Rudolph T.H., Perala R.H. [104], Имянитов И.М. [20], Чубарина Е.В. [60], Пономарев Ю.Ф. [39], Михайловский Ю.П. [32], Синькевич А.А. [44].

Актуальность темы исследования определяется тем, что используемые авторами методы калибровки бортовых измерителей обладают многими существенными недостатками, трудно реализуемы на практике ИЛИ не обеспечивают необходимую точность. Это свидетельствует о необходимости установки большего числа датчиков, тщательного выбора мест установки и определения калибровочных коэффициентов корректировки методики 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 электрических характеристик, таких как напряженность электрического поля. Точный расчет калибровочных коэффициентов позволит сократить необходимое количество специальных дорогостоящих полетов, дополнительно проводимых для их корректировки.

**Целью** диссертационной работы 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 физико-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.

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

**Объектами исследования** являются напряженность электрического поля в атмосфере и заряд летательных аппаратов.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

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

2. Разработана методика физико-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.

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 вычислены матрицы калибровочных коэффициентов и осуществлен анализ результатов исследований электрических полей и заряда летательного аппарата, полученных при помощи самолетов Ил-14, Як-42Д «РОСГИДРОМЕТ» и других.

**Теоретическая и практическая значимость.** В диссертации поставлена и решена актуальная научная и практическая задача, которая заключается в обосновании и разработке методики физико-математического моделирования электростатических полей, основанной на применении современных вычислительных средств и позволяющей выбирать оптимальную конфигурацию датчиков на летательном аппарате и производить расчет калибровочных коэффициентов.

Повышенная точность расчета коэффициентов даст возможность получать надежные и достоверные данные об электрических полях атмосферы и сократить количество специальных полетов, требующихся для дополнительной калибровки измерительной системы.

Разработанная методика была использована при анализе данных, полученных в ходе летных экспериментов по измерению напряженности электрического поля и собственного заряда самолетов Ил-14 и Як-42Д, а также в ходе выполнения НИР «Предоставление информационно-аналитических данных по структурам электрических полей облаков», выполненной в ГГО им. А.И. Воейкова в 2018 г.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач были использованы методы математического моделирования электростатических

явлений, метод расчета электростатического поля при помощи уравнения Пуассона. В ходе анализа результатов экспериментальных исследований применялись методы статистической обработки данных.

#### Научные положения, выносимые на защиту:

1. Метод расчета калибровочных коэффициентов для измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда летательного аппарата на основе физико-математического моделирования электростатических полей.

2. Для исследования электрических полей и других характеристик атмосферы следует широко использовать беспилотные летательные аппараты.

3. 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, высокослоистых и перисто-слоистых облаках;

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

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

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается анализом предшествующих научных работ в области исследований 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.

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

Апробация работы. 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 военноприкладной геофизики и контроля состояния природной среды» (СПб, 2018).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской федерации для публикации основных результатов диссертационных исследований.

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:

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

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка используемых источников. Объем работы составляет 138 страниц, работа иллюстрирована 78 рисунками и 24 таблицами. Список используемых источников содержит 116 наименований.

#### Глава 1. Методы исследования электрических характеристик атмосферы

## 1.1. Источники и причины появления сильных электрических полей в атмосфере

Процессы электризации гидрометеоров и облачных частиц являются причиной образования заряженных областей в облаках. Если процессы электризации будут проходить достаточно интенсивно, а процессы рекомбинации зарядов – сравнительно медленно, становится возможным накопление и разделение зарядов в отдельных частях облака. Процесс разделения разноименно заряженных частиц в пространстве, приводящий к формированию электрической структуры облака, называется макроэлектризацией облака [26].

В процессах электризации, которые происходят в облаках, участвуют ионы, образующиеся в воздухе и воде (в твердом или жидком состоянии). Электризация облачных частиц при контакте с воздушными ионами обеспечивается влиянием электрического поля, параметрами поверхностного слоя облачных частиц и диффузией ионов (левая часть рис. 1). Электризация облачных частиц при участии молекулярных ионов происходит при контакте облачных частиц с твердыми частицами осадков. Процессы электризации происходят в результате действия электрического поля или благодаря физико-химическим свойствам воды (правая часть рис. 1) [36].

За время изучения электрической природы грозовых явлений было исследовано множество различных процессов электризации гидрометеоров и облачных частиц [26, 95, 105]. В настоящее время еще не установлено, какой из процессов является наиболее мощным и имеет достаточную интенсивность для формирования грозовых зарядов. Далее будут рассмотрены некоторые процессы электризации, которые считаются играющими наибольшую роль в образовании областей заряженных частиц в облаках и атмосферного электричества в целом.



Рисунок 1 – Схема процессов электризации гидрометеоров

#### Ионная электризация гидрометеоров

Поляризующиеся облачные В электрическом поле частицы при определенных условиях могут осуществлять захват атмосферных ионов [114]. Верхняя и нижняя половины облачной частицы, не имеющей заряда и помещенной в вертикальное электрическое поле, приобретают заряды противоположных знаков. Если градиент потенциала положителен, то верхняя половина частицы будет заряжена отрицательно, а нижняя – положительно. Электризация частицы возможна, если скорость падения этой частицы превышает скорость направленного вниз потока положительных ионов. В данном случае положительные ионы отталкиваются нижней частью гидрометеора, в то время как поднимающиеся вверх отрицательные ионы ею притягиваются [59]. В результате он приобретает преимущественно отрицательный заряд, усиливая существующее электрическое поле, что было подтверждено лабораторными исследованиями [37, 78]. Скорость электризации частиц зависит от напряженности поля и значений полярных проводимостей воздуха. Величина заряда частиц определяется различиями в подвижности положительных и отрицательных атмосферных ионов И ИХ количественным соотношением [113].

Заряжение облачных частиц за счет ионов атмосферы является причиной возникновения только небольших зарядов в облаке на их начальной стадии развития. Данный механизм не может привести к существенной электризации облачных частиц, необходимой для развития грозовых процессов [26, 95].

Электризация крупных ледяных частиц при столкновении с облачными частицами

Один из наиболее изученных механизмов электризации – столкновение крупных ледяных частиц (градин или крупинок) с ледяными частицами (кристалликами). Данный процесс приводит к взаимной электризации этих частиц [108]. В результате экспериментальных наблюдений многие исследователи обнаруживали различные закономерности, однако не существует единой теории, объясняющей все наблюдаемые эффекты.

При контакте происходит обмен электронами и ионами между телами, пока не наступит термодинамическое и электростатическое равновесие. Величина зарядов определяется условиями и процессами, существующими в зоне контакта [19]. На заряжение частиц оказывают влияние следующие факторы: водность и температура в среде столкновения, примеси, изменяющие поверхностные свойства кристаллической фазы воды, размер кристалликов и их скорость [26, 84, 94, 111].

В облаке электризация частиц проходит в условиях, сопровождающихся в том числе и трением между ними. Из-за трения между частицами условия электризации должны сильно изменяться, так как при трении возникают и быстро протекающие контакты частиц в отдельных соприкасающихся точках, и разрушение поверхностного слоя в этих точках. Оба этих эффекта должны приводить к дополнительной электризации трущихся частиц. Анализ исследований электризации при трении приводит к выводу, что при трении ледяных частиц о поверхность ледяных тел первые, как правило, электризуются отрицательно, а вторые – положительно [36].

Степень и знак электризации при столкновении и трении ледяных частиц зависят от большого числа факторов. Ввиду многообразия этих факторов чрезвычайно трудно сопоставлять условия проведения опытов и установить значимость каждого из них, что необходимо для развития количественной теории электризации ледяных частиц при их столкновениях.

Электризация крупных ледяных частиц при столкновении с переохлажденными облачными каплями

Столкновение переохлажденных облачных капель с градиной или крупинкой может сопровождаться двумя различными процессами: разбрызгиванием капли по поверхности ледяной крупинки или раскалыванием капли при замерзании на поверхности крупинки. Произойдет ли разбрызгивание или раскалывание капли, вероятно, зависит от режима роста крупинки. При сухом режиме капли взрываются, при мокром разбрызгиваются [26, 105].

Разрушение капли при столкновении вызывает электризацию крупинки или градины. От того, каким образом происходило разрушение капли, зависит не только величина, но и знак результирующего заряда.

При разбрызгивании и намерзании капель на крупинках или градинах разделение заряда происходит как следствие фрагментации капель и кристаллизации их частей на поверхности льда. Многочисленные эксперименты показали, что заряжение ледяной мишени зависит от следующих факторов: размеров переохлажденных капель, скорости столкновения капель с крупинкой или градиной, состава примесей в каплях воды, напряженности поля в месте столкновения [89, 106, 107]. При этом частица, как правило, заряжается положительно.

При замерзании и раскалывании переохлажденной капли образуются ледяные осколки, которые обычно заряжаются положительно. Если при этом оставшаяся вода намерзает на поверхности ледяной частицы, то она заряжается отрицательно. В результате обобщения множества экспериментальных работ была обнаружена прямая зависимость значений зарядов, разделяющихся при раскалывании переохлажденных капель от размеров капель [26, 36, 107].

Еще одним фактором генерации и разделения зарядов при замерзании переохлажденных капель на частицах крупы и градинах является выделение пузырьков газа на поверхности капель. Пузырьки газа могут вызывать раскалывание кристаллизующихся капель, при котором образуется большое количество кристаллов льда, и одновременно уносить определенное количество

электрического заряда (преимущественно положительного) [16].

Макроэлектризация кучево-дождевых облаков

Кучево-дождевые облака вносят наибольший вклад в атмосферные процессы, связанные с электричеством. Процесс макроэлектризации протекает не только в кучево-дождевых облаках, но только в них разделение зарядов приводит к формированию электрической структуры с напряженностью поля, достаточной для образования грозовых разрядов. Для этих облаков характерны значительные вертикальные размеры, ограниченная горизонтальная протяженность, мощные вертикальные воздушные потоки и турбулентность, а также интенсивные осадки, сопровождающиеся грозами [59].

Основная величина объемных электрических зарядов кучево-дождевых облаков формируется за счет зарядов облачных частиц и гидрометеоров. В меньшей степени на формирование объемных зарядов оказывают влияние заряды ионов [36, 49, 95, 105].

По мере развития кучево-дождевого облака последовательно включаются различные процессы электризации. На начальном этапе работает ионное заряжение. При появлении твердых частиц и кристаллов включается механизм электризации твердых частиц при взаимодействии с льдом и каплями. Именно они играют ключевую роль в электризации облака [1]. Спонтанная электризация и дальнейшая поляризация облака происходит тогда, когда кристаллы становятся достаточно крупными для движения навстречу восходящим воздушным потокам и зона осадков в облаке перемещается в нижнюю часть. В верхней части облака преобладает «сухой» рост ледяных частиц, при этом верхняя часть облака заряжается положительно, поскольку ледяные частицы уносят отрицательный заряд в центральную часть облака. В центральных частях при больших температуре и водности облака преобладает «мокрый» режим роста частиц, и частицы заряжаются положительно. Таким образом крупные ледяные частицы, заряжаясь и перезаряжаясь по мере движения вниз, формируют электрическую структуру облака [26].

#### 1.2. Методы измерений электрических полей в атмосфере

Электрическое поле атмосферы возникает вследствие совокупного действия объемных зарядов, содержащихся в атмосфере, и заряда земной поверхности. Напряженность электрического поля принимает различное направление в различных точках в атмосфере, а его величина изменяется в очень широких пределах.

Так как поверхность земли является проводником, силовые линии электрического поля должны быть перпендикулярны к ней. Следовательно, эквипотенциальные поверхности у земли должны быть горизонтальными, а напряженность поля – вертикальной [24, 25, 59].

Энергетической характеристикой электрического поля атмосферы является электрический потенциал (Ф). Напряжённость электрического поля выражается через потенциал следующим образом:

$$\vec{E} = -\nabla \Phi. \tag{1}$$

Определить значение компонент напряженности электрического поля можно, рассчитав величину электрического потенциала  $\Phi$  в точке с координатами x, y, z:

$$E_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \ E_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}, \ E_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}.$$
 (2)

Под термином «вертикальный градиент потенциала у земли» понимают либо действительное значение  $\partial \Phi / \partial z$  на поверхности, либо потенциал на высоте 1 м [59]. Напряженность в какой-либо точке электрического поля *E* измеряется в вольтах на метр (В/м) и равна градиенту потенциала  $\Phi$  в этой точке, взятому с обратным знаком:

$$E = -\nabla \Phi. \tag{3}$$

Первую группу методов измерений напряженности поля составляют методы измерения разности потенциала между двумя точками, расположенными на различных высотах. В большинстве случаев потенциал находят с помощью различного рода устройств для выравнивания потенциалов – коллекторов.

Методы измерений напряженности поля второй группы подразумевают под собой измерение «связанного» заряда на поверхности земли или на теле, соединенном с землей. У плоской поверхности земли поверхностная плотность заряда  $\sigma$  взаимосвязана с напряженностью поля *E* соотношением

$$\sigma = -\varepsilon_0 E,\tag{4}$$

где *ɛ*<sub>0</sub> – электрическая постоянная.

Для приведения наблюдений в реальных условиях к условиям, соответствующим равнинному участку местности, вводится так называемый коэффициент редукции [59].

Далее рассмотрены основные типы устройств первой и второй группы.

#### Коллекторы

Для измерения потенциала электрического поля в некоторой точке необходимо использовать устройство, сообщающее металлическому телу потенциал равный потенциалу точки, в которой оно находится. Это позволит определить градиент потенциала путем измерения разности потенциалов между телом и землей при помощи электрометра или вольтметра. При этом измерительный прибор должен иметь высокое внутреннее сопротивление [59]. Благодаря собственной проводимости воздуха металлическое тело (проводник) постепенно, но очень медленно будет приобретать потенциал окружающей среды. Время установления значения потенциала у данного процесса при проведении измерений у поверхности земли может превышать 10 минут [25].

Ускорения этого процесса можно достигнуть различными способами, например, с помощью сброса водяных капель или посредством ионизации воздуха, окружающего проводник. Устройства, действующие подобным образом, принято называть выравнивателями потенциала или коллекторами [59]. Далее будут рассмотрены некоторые разновидности данных приборов.

#### Капельный коллектор

Капельный коллектор обычно представляет собой резервуар с водой, помещенный в укрытии, и горизонтальной трубки, выступающей из него. Поток

воды регулируется таким образом, чтобы он разбивался на поток капель на конце трубки. Резервуар связан с электрометром для измерения потенциала.

Если потенциал коллектора будет отличаться от потенциала окружающего воздуха, то эта разность потенциалов вызовет появление градиента потенциала, причем силовые линии электростатического поля будет оканчиваться на капле. Если потенциал коллектора и капли будет меньше потенциала окружающего воздуха, то капля, отрываясь, будет уносить отрицательный заряд, потенциал коллектора будет увеличиваться, приближаясь к потенциалу окружающей среды. Имея достаточный запас воды, можно применять капельный коллектор для непрерывных измерений градиента потенциала [59, 77].

#### Радиоактивный коллектор

Для снижения времени установления потенциала коллектора могут применяться радиоактивные вещества. Обычно на коллектор наносится небольшое количество радиоактивного вещества, излучающего α-частицы. Радиоактивное излучение α-частиц ионизирует воздух вблизи коллектора, и благодаря разности потенциалов возникает движение ионов, выравнивающих потенциал коллектора с потенциалом земли.

Ралиоактивный коллектор также соединяется электрометром. С Соединительный кабель большой длины при этом увеличивает емкость системы и уменьшает чувствительность коллектора. Поэтому радиоактивные коллекторы требует устанавливают вблизи зданий, что введения дополнительного коэффициента. Также необходимо отметить дополнительные трудности, связанные с использованием радиоактивных веществ.

К недостаткам радиоактивного коллектора можно также отнести то, что созданные им и унесенные в атмосферу ионы, сами по себе вызывают возмущение электрического поля. Кроме того, при определенных условиях на показания коллектора оказывают влияние ветер и дождь, который может вызывать накопление на коллекторе своего собственного заряда [59].

#### Пламенные и фитильные коллекторы

Пламенный коллектор действует одновременно как капельный, образуя

частицы, которые, покидая коллектор, уносят заряды, и как радиоактивный, ионизируя окружающий воздух. Тлеющий фитиль, если его использовать вместо пламени, дает даже лучшие результаты, так как он горит дольше и производит меньше механических и электрических возмущений в окружающей среде.

В ряде случаев фитильный коллектор имеет преимущества перед радиоактивным, например, простота изготовления и использования. Но он не может работать в течение длительного времени, а его высота меняется по мере сгорания [59].

#### Пассивная антенна

Пассивная проволочная антенна является одним из наиболее часто используемых устройств – выравнивателей потенциала. Обычно он представляет собой тонкий неизолированный горизонтальный провод, натянутый на высоте 1 м над землей между изоляторами на двух мачтах. Для измерения потенциала антенны используют электрометр. Малые токи, достаточные для того, чтобы очень быстро сравнять потенциал антенны с потенциалом окружающего воздуха, обеспечиваются естественной ионизацией воздуха в атмосфере. Однако пассивная антенна пригодна для использования только в сухую погоду.

Небольшая толщина провода и расположение мачт на большом расстоянии друг от друга (20 м) гарантируют, что искажение атмосферного электрического поля будет пренебрежимо малым, следовательно, пассивная антенна может использоваться в качестве эталонного средства измерений для калибровки других измерителей [77].

#### Динамические приборы для измерения напряженности поля

Поверхностная плотность индуцированного заряда  $\sigma$  на поверхности земли пропорциональна градиенту потенциала E на ее поверхности и выражается соотношением (4).

Осуществить непрерывное измерение градиента потенциала путем непосредственных измерений связанного заряда нельзя, так как измерить связанный заряд можно лишь, «освободив» его. Это производится через определенные интервалы времени, например, при помощи установки заземленного экрана над исследуемым участком поверхности.

С помощью приборов, работающих на данном принципе, происходит измерение числа силовых линий, оканчивающихся на поверхности, над которой устанавливается заземленная пластина, что эквивалентно измерению разности потенциалов между точками, расположенными на различных высотах. Для того чтобы получить непрерывный сигнал при измерении связанного заряда, необходимо попеременно экранировать проводник от поля и экспонировать его в поле и соединить с каким-либо измерительным прибором [59].

Приборы, предназначенные для непрерывного измерения градиента потенциала у земли по индуцированному заряду, называют «приборами напряженности поля». Приборы напряженности поля могут иметь на выходе сигнал переменного или пульсирующего постоянного тока. Благодаря быстрому времени отклика, широкому динамическому диапазону измерений, возможности работы в дождь и снег приборы напряженности поля являются наиболее удобными средствами непрерывных измерений и на сегодняшний день получили широкое распространение [80].

В приборах напряженности поля, называемых «электростатическими флюксметрами», либо заземленный экран попеременно экспонирует и экранирует проводник, соединенный с землей через измерительный прибор, либо экран закреплен, а проводник перемещается относительно него, попеременно открываясь и закрываясь. В устройствах, которые называются «индукционными вольтметрами», экран движется, а проводник остается неподвижным. В «агриметрах», наоборот, проводник (или набор проводников) движется, а экран неподвижен [59].

Одиночный прибор напряженности поля не может быть использован для измерения напряженности поля в расположенной над земной поверхностью точке, поскольку заряд на экспонированной части измерительной пластины зависит не только от внешнего поля, но и от разности потенциалов между измерительной пластиной и окружающей средой. Но если взять два прибора напряженности поля, расположенных симметрично по отношению к плоскости перпендикулярной

направлению измеряемого поля, то разность выходных напряжений будет пропорциональна действительной напряженности электрического поля, а сумма выходных напряжений приборов будет пропорциональна разнице между потенциалами корпуса прибора и окружающей среды [20].

#### Электростатические флюксметры

Электростатический флюксметр – это прибор, содержащий неподвижную измерительную и вращающуюся экранную пластины. Вращающаяся пластина преобразует воспринимаемый потенциал в переменное напряжение, неподвижная измерительная пластина воспринимает измеряемый потенциал.

Существует несколько вариантов исполнения электростатических флюксметров. Обычно прибор состоит из неподвижной круглой измерительной пластины, над которой закреплена другая пластина, состоящая из ДВУХ 90-градусных секторов круга. Между этими пластинами помещена такая же заземленная вращающаяся пластина. Вращающаяся пластина (ротор) вращается в горизонтальной плоскости с постоянной скоростью так, что измерительная пластина попеременно открывается, подвергаясь действию поля, и экранируется. В цепи, соединяющий измерительную пластину с землей, возникает переменный электрический ток. Обычно используются фазочувствительные детекторы сигнала, при этом положение ротора определяется оптическими или магнитными ключами. Наведенный ток будет переменным с частотой равной частоте вращения, а величина сигнала пропорциональна атмосферному электрическому полю [77]. Пример внешнего вида электростатического флюксметра приведен на рис. 2 [65].

Некоторые конструкции флюксметров могут предусматривать подключение отрицательной обратной связи к верхним пластинам, различные формы измерительных и экранирующих пластин, позволяющие получать на выходе синусоидальный сигнал. Для измерения очень быстрых изменений напряженности поля измерительная пластина делится на несколько рядов секторов, экранирующихся попеременно.



Рисунок 2 – Внешний вид электростатического флюксметра

В других конструкциях электростатических флюксметров измерительная пластина может представлять собой цилиндр, вращающийся вокруг оси, расположенной в горизонтальной плоскости, перпендикулярно градиенту потенциала; полосы, перемещающиеся в горизонтальном направлении под заземленной пластиной с аналогичными щелями; кольцо на конце стержня, вращающееся в вертикальной плоскости, нижняя половина пути которого при перемещении лежит в заземленном корпусе [59].

#### Индукционный вольтметр

В индукционном вольтметре и агриметре измерительная пластина не всегда соединена с измерительным прибором, как в электростатическом флюксметре, она соединена с землей, когда она открыта для воздействия поля, и соединена с измерительным прибором, когда экранирована. Измерительным прибором служит гальванометр, который регистрирует постоянный ток, либо электрометр.

В индукционном вольтметре экран движется над закрепленной измерительной пластиной. В соответствующие моменты времени специальное устройство соединяет пластину то с измерительным прибором, то с землей [102].

#### Агриметр

В агриметре измерительная пластина движется по цилиндрической поверхности вокруг горизонтальной оси. В одном положении она подвержена действию поля и заземлена. В противоположном положении, когда пластина экранирована, она соединена с электрометром, который принимает наведенный в первом положении заряд [112].

#### 1.3. Механизмы заряжения самолетов в облаках и осадках

Электрический заряд на поверхности самолетов или других летательных аппаратов, предназначенных для измерения атмосферно-электрических характеристик и микрофизических характеристик облаков, а также токи, текущие на них, существенным образом сказываются на точности измерений. Более того, погрешности могут быть столь велики, что делают измерения невозможными [22].

Значения токов, текущих между самолетом и атмосферой, заряжающих и разряжающих самолет, определяются следующими характеристиками атмосферы и самолета: фазовым состоянием, формой, размерами, электрическим зарядом и числом облачных частиц, величиной напряженности поля, конструкцией, материалами покрытия, типом двигателей самолета, его режимом полета, высотой и скоростью [21].

Наибольший вклад в формирование токов заряжения вносит взаимодействие облачных частиц с обшивкой самолета и улетающие частицы несгоревшего топлива. При этом токи, вызванные частицами топлива, обычно сравнительно малы по сравнению с токами, вызванными взаимодействием с облачными частицами. Токи разрядки вызваны проводимостью атмосферы, токами коронного разряда, текущими через разрядники и другие части самолета, проводимостью струй газов выхлопа и срывом облачных частиц с поверхности самолета [21].

Скоростные самолеты заряжаются более интенсивно, а на максимальных режимах полета заряжаются сильнее, чем на минимальных, поскольку токи разрядки, вызванные срывом частиц, пропорциональны второй степени скорости самолета, а токи заряжения самолета пропорциональны третьей степени скорости

#### [40, 85, 101].

#### Токи заряжения и разрядки в облаках

Заряжение самолета в облаках является частным случаем статической электризации. Когда электрически нейтральная частица облаков касается поверхности самолета и отскакивает от нее, она уносит заряд одного знака, а самолет приобретает противоположный заряд, равный по значению заряду, унесенному частицей. Величина этого заряда зависит от свойств поверхностей самолета и частицы. Этот процесс повторяется раз за разом при каждом ударе частиц о поверхность самолета, составляя ток заряжения. Кроме того, каждая отрывающаяся от поверхности частица уносит часть заряда самого самолета, создавая коллекторный ток разрядки. Эти токи являются основными токами, текущими на самолет, их величины зависят от свойств облаков – водности, фазового состояния, распределения размеров частиц.

Процесс взаимодействия капель и ледяных кристаллов с поверхностью самолета слишком сложен, чтобы можно было получить простое аналитическое выражение для связи между токами заряжения и разрядки, размером капель облаков и осадков. Существует экспериментально установленная зависимость тока заряжения тела *I*<sub>3</sub>, движущегося в потоке капель [40]:

$$I_3 \approx A\varphi_{\kappa} \frac{\omega}{r^2} S\vartheta^{3,4},\tag{5}$$

где A – размерный коэффициент,  $\varphi_{\kappa}$  – контактная разность потенциалов,  $\omega$  – водность невозмущенного воздушного потока,  $\overline{r^2}$  – средний радиус капель, S – площадь поверхности контакта самолета и водных частиц,  $\vartheta$  – скорость потока.

Значение размерного коэффициента A зависит от конструктивных параметров тела. Для самолета этот коэффициент зависит от угла стреловидности и профиля крыла или крыльев. Величина  $\varphi_{\kappa}$  зависит от фазового состояния облачных частиц и материалов поверхности тела. Например, в кристаллических облаках заряжение происходит интенсивнее, чем в капельных теплых облаках той же водности. В облаках высокой водности токи заряжения самолета могут достигать десятков и сотен миллиампер [40]. Обледеневшие, а также неметаллические части самолета заряжаются сильнее, чем другие. Наибольшие величины электризации достигаются на поверхностях, покрытых диэлектрическими материалами. При этом интенсивность заряжения зависит только от свойств наружной поверхности обшивки самолета и практически не зависит от свойств других слоев обшивки. В условиях интенсивной электризации между поверхностями диэлектрических обтекателей и ближайших металлических поверхностей могут даже происходить электрические разряды, являющиеся мощными источниками помех в широком диапазоне спектра [21].

Электризация самолета, связанная с работой двигателей

Даже в безаэрозольной среде самолеты могут иметь электрический заряд, связанный с истечением выхлопных газов его двигателей. Вылетающие из выхлопной трубы самолета частички несгоревшего топлива за счет контактной разности потенциалов с трубой уносят определенный заряд. Однако истечение выхлопных газов не только увеличивает заряд самолета, но и одновременно работает, как система разрядки благодаря увеличенной проводимости струи газов вследствие ее температурной ионизации. Таким образом, может существовать определенный равновесный заряд самолета за счет действия двух противоположно действующих механизмов воздействия работающих двигателей. В зависимости от характеристик топлива, высоты полета, режима работы двигателей, собственного заряда самолета величина равновесного заряда может меняться в одну или другую сторону [40].

Поскольку, заряжение самолета, связанное с работой двигателей, значительно ниже, чем аэрозольное заряжение даже в неплотных облаках, то при анализе токов в полете этим заряжением можно пренебречь, однако на стоянке при отсутствии хорошего заземления тока заряжения от двигателя может быть достаточно, чтобы вызывать мощные электростатические разряды [85].

#### 1.4. Методы измерения электрических полей с летательных аппаратов,

#### погрешности измерений

#### Измерения при помощи аэростатов и планеров

Для того чтобы иметь возможность производить измерение напряженности электрического поля в точках, удаленных от земли, необходимо использовать авиацию. В некоторой степени аэростаты являются подходящими средствами для таких измерений, так как на них нет двигателей, генерирующих заряд, и они могут оставаться неподвижными.

Для проведения аэростатных измерений с учетом собственного заряда аэростата используются коллекторы или системы коллекторов, расположенных на различной высоте, в настоящее время также применяются дифференциальные измерительные пары электростатических флюксметров [7, 116].

Однако даже само присутствие аэростата искажает электрическое поле, следовательно, необходимо вносить поправки в результаты измерений. В большинстве случаев аэростат несет на себе некоторый заряд, слагающийся из заряда, полученного аэростатом на поверхности земли при взлете, и заряда, возникшего в результате сбрасывания балласта.

Также для измерения напряженности поля можно использовать планеры, подвергающиеся меньшему собственному заряжению, чем самолеты. Однако во многом планеры подвержены тем же ограничениям, что и аэростаты, и не имеют многих преимуществ, которые дают самолеты. Необходимо также отметить, что аэростаты больше подходят для построения вертикальных профилей измеряемых параметров атмосферы, а планеры и самолеты – горизонтальных профилей [100].

#### Измерения при помощи 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. Самолеты в полете очень легко заряжаются, это приводит к искажению силовых линий электрического поля и не дает возможности измерить напряженность поля одним датчиком. Быстрое перемещение самолета лишает возможности использовать для устранения собственного заряда те методы, которые применимы для аэростатов. Турбулентность, вызываемая самолетом, и уносимый выхлопными газами заряд также могут являться причиной возникновения погрешностей.

На сегодняшний день наиболее подходящим прибором для измерения электростатических полей при помощи самолетов является электростатический флюксметр. Применение современных материалов, электронных усилительных и измерительных схем позволило достичь высокого соотношения сигнал-шум и открыло возможность использования электростатических флюксметров для измерения как сильных, так и слабых полей даже в высоких слоях атмосферы. Подробное описание конструкции современных образцов электростатических флюксметров приводят, например, такие исследователи как Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П. [25], Winn W.P. [115], Bateman M.G. и др. [65], Коровин Е.А. и др. [30].

Для проведения достоверных измерений напряженности электростатического поля при помощи самолетов в одном направлении необходимо использовать систему, состоящую как минимум из двух, а лучше – из трех измерителей. Измерение всех трех компонент электрического поля зачастую затруднено невозможностью установки измерительной аппаратуры на борту в местах, наиболее подходящих для этих целей, и, как будет показано далее, требует установки пяти – шести измерителей и более.

Электростатические флюксметры, установленные на борту самолета, могут измерить напряженность поля только в конкретной заданной точке. В связи с этим основная задача исследователя состоит в калибровке измерительной системы с учетом искажений электрического поля самолетом. Существуют различные способы произвести калибровку измерительной системы: при помощи масштабного моделирования воздушного судна, при помощи компьютерного

моделирования воздушного судна, а также с помощью проведения измерений при выполнении специальных полетов путем совершения эволюций по тангажу и крену в условиях «хорошей погоды», когда величины измеряемых электрических полей могут быть оценены с высокой точностью независимыми измерениями.

Метод масштабного моделирования обеспечивает установку заданных начальных условий, но невозможность точного исполнения масштабных моделей и значительные погрешности (около 15 %) измерений на моделях приводят к большим погрешностям расчетов напряженности поля [25]. В работе коллектива авторов ГГО им. А.И. Воейкова [53] показано, что при большом собственном заряде самолета и небольших значениях полей погрешность определения компонент электрического поля может составлять сотни процентов даже при подобных относительно небольших погрешностях в моделировании. Масштабное моделирование использовалось многими исследователями (Имянитов И.М. [21], Чубарина Е.В. [60], Harris-Hobbs R. [83]).

Метод калибровки с помощью реальных полетов также часто использовался как в России, так и за рубежом. Среди отечественных исследователей данным методом пользовались Белов Б.А. и др. [9], Михайловский Ю.П. [32]. Применение самолетов для зондирования электрического поля атмосферы и методы такого определения коэффициентов формы летательного аппарата описаны в зарубежных работах Winn W.P. [115], MacGorman D.R., Rust W.D. [90], Мо Q. и др. [99]. Применяемый исследователями Dye J.E., Lewis S. [74], Bateman M.G. и др. [65] на практике метод калибровки флюксметров на самолете в условиях хорошей погоды относительно эталонного измерителя описан нескольких зарубежных В публикациях Mach D.M. [92, 93], Koshak W.J. [86, 87]. Следует отметить следующие недостатки данного метода: необходимость выполнения специальных дорогостоящих полетов, потребность в дополнительном специализированном измерительном оборудовании, а также высокие требования к точности моделей напряженности поля «хорошей погоды», используемых при дальнейших расчетах.

По сравнению с методом компьютерного моделирования применявшийся в основном на сегодняшний день метод масштабного моделирования более

дорогостоящий, трудоемкий, требует больших затрат времени и менее точный. Компьютерное моделирование также требует принятия некоторых допущений и требует проведения большого одновременно количества математических вычислений. Ранние работы, основанные на решении уравнений Максвелла в трех измерениях, упирались В несовершенство вычислительных средств И невозможность моделирования среды и тел с разрешающей способностью менее 0,5 м [104]. Однако, как будет показано далее, на сегодняшнем уровне развития вычислительной техники компьютерное моделирование дает возможность исследователю получить необходимые данные с необходимой точностью. Компьютерное моделирование позволяет еще на этапе оборудования самолеталаборатории определить положение электрических нейтралей, выработать рекомендации по расположению датчиков на конкретном летательном аппарате и выполнить расчет калибровочных коэффициентов.

#### Выводы к главе 1

 Исследование электрических характеристик атмосферы имеет фундаментальное значение для понимания физических процессов, происходящих в атмосфере и в облаках.

2. Наиболее подходящим способом для исследования электрических полей атмосферы и облаков, благодаря большой скорости и маневренности является использование специализированных самолетов-лабораторий.

3. Для обеспечения измерений на борту самолета электрических полей атмосферы и собственного заряда летательного аппарата необходимо использовать системы измерителей, состоящие из нескольких электростатических флюксметров.

4. Компьютерное моделирование менее затратное и трудоемкое, имеет определения существенное преимущество калибровочных В точности коэффициентов перед масштабным моделированием и, таким образом, является калибровки измерительной перспективным методом системы И может использоваться совместно с методом уточнения калибровочных коэффициентов в полете.

# Глава 2. Описание методики измерения напряженности электрического поля и заряда летательного аппарата

# 2.1. Модель измерений напряженности электрического поля и заряда летательного аппарата

Двумя основными требованиями к измерительной системе, состоящей из электростатических флюксметров, на летательном аппарате являются возможность измерять величины напряженности атмосферных полей с достаточной точностью в условиях хорошей погоды и при наличии облаков, осадков, туманов и способность надежно осуществлять измерения в условиях неблагоприятных внешних воздействующих факторов.

Типичные величины напряженности электростатических полей варьируются от нескольких десятков вольт до нескольких сотен киловольт на метр. При этом окружающее электрическое поле может быть значительно меньше измеряемого, ввиду больших значений собственного заряда самолета во времени. Собственный заряд самолета делает значение измеряемого электрического поля очень большим, это приводит к тому, что вычисление величины напряженности окружающего электрического поля включает в себя вычитание двух очень больших, почти равных между собою величин, чтобы получить меньшую величину. Это в свою очередь делает необходимым обеспечение крайне высокой точности измерений в широком диапазоне значений и такой же высокой точности при определении калибровочных коэффициентов (коэффициентов формы).

На высоте нескольких километров величина напряженности электрического поля в ясную погоду имеет величину от 20 В/м до 30 В/м. Для измерения таких величин необходимо иметь разрешающую способность измерителей порядка 1 В/м. Требуемый динамический диапазон составляет более 100 дБ [65].

Окружающая среда, влиянию которой подвержены вращающиеся лопасти флюксметра, накладывает серьезные требования к конструкции прибора. Температура окружающей среды может варьироваться от минус 60°C до 50°C. Давление воздуха изменяется от давления на уровне моря до всего лишь 55 гПа на высоте 20 км. Во время полета могут встретиться ливневые осадки, самолет может быть подвержен обледенению. Любое воздушное судно подвержено механическим и акустическим вибрациям, во время посадки испытывает серьезные ударные нагрузки.

Для определения всех трех компонент вектора напряженности электрического поля и собственного заряда требуется установка на самолете как минимум четырех электростатических флюксметров. Из соображений симметрии и обеспечения избыточности измерительной информации на воздушном судне, как правило, устанавливается от пяти до восьми флюксметров [65].

Как было указано ранее, прежде чем проводить измерения напряженности поля, необходима «калибровка» системы флюксметров. Другими словами, требуется найти соотношение между окружающим электрическим полем E(t):

$$\mathbf{E}(t) = E_X(t)\hat{\mathbf{x}} + E_Y(t)\hat{\mathbf{y}} + E_Z(t)\hat{\mathbf{z}},$$
(6)

и выходным сигналом флюксметров  $\mathbf{a}(t)$ :

$$\mathbf{a}(t) = \mathbf{w}[\mathbf{E}(t)],\tag{7}$$

где  $\hat{\mathbf{x}}$  – положительное направление вдоль строительной оси самолета,  $\hat{\mathbf{y}}$  – направление по левому крылу,  $\hat{\mathbf{z}}$  – направление в зенит,  $\mathbf{a}(t)$  – вектор значений выходных сигналов флюксметров,  $\mathbf{w}$  – векторная функция, характеризующая зависимость измерений датчиков от напряженности внешнего поля.

Составляющие функции-вектора **w** в общем случае являются нелинейными функциями компонент напряженности поля E(t). Функцию **w** можно обозначить как прямую зависимость. Обозначим обратную зависимость между выходными значениями флюксметров и напряженностью поля векторной функцией **W**:

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{W}[\mathbf{a}(t)]. \tag{8}$$

Для расчета напряженности поля по выходным измерениям датчиков необходимо знать выражение **W**, а не **w**. Обратную зависимость можно определить, зная прямую зависимость, при помощи математических методов. Напрямую же определить обратную зависимость можно при помощи методов калибровки,

изложенных выше.

Если принять зависимость между напряженностью электрического поля и выходными сигналами флюксметров линейной, то можно описать модель измерений следующим образом:

$$a_i = M_{iX}e_X + M_{iY}e_Y + M_{iZ}e_Z + M_{iQ}Q,$$
(9)

где  $a_i$  – выходной сигнал *i*-го флюксметра,  $M_i$  – коэффициенты формы для *i*-го флюксметра,  $e_X$ ,  $e_Y$ ,  $e_Z$  – компоненты измеряемого электрического поля, Q – собственный заряд летательного аппарата.

Для продолжительных во времени измерений и *m* установленных на борту ЛА датчиков получим следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{cases}
 a_{1} = M_{1X}e_{X} + M_{1Y}e_{Y} + M_{1Z}e_{Z} + M_{1Q}Q \\
 a_{2} = M_{2X}e_{X} + M_{2Y}e_{Y} + M_{2Z}e_{Z} + M_{2Q}Q \\
 \vdots \\
 a_{m} = M_{mX}e_{X} + M_{mY}e_{Y} + M_{mZ}e_{Z} + M_{mQ}Q
 \end{cases},$$
(10)

Систему уравнений (10) можно записать в виде:

$$\mathbf{a} = \mathbf{M}\mathbf{e},\tag{11}$$

где а – вектор выходных значений полезного сигнала флюксметров:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix},\tag{12}$$

е – вектор значений напряженности внешнего электрического поля и заряда летательного аппарата:

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_X \\ e_Y \\ e_Z \\ e_Q \end{bmatrix},\tag{13}$$

**М** – калибровочная матрица размером m × 4:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{1X} & M_{1Y} & M_{1Z} & M_{1Q} \\ M_{2X} & M_{2Y} & M_{2Z} & M_{2Q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{mX} & M_{mY} & M_{mZ} & M_{mQ} \end{bmatrix}.$$
 (14)

Решая уравнение (11) относительно е, получим:

$$\mathbf{e} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{a},$$
  
$$\mathbf{e} = \mathbf{B}\mathbf{a},$$
 (15)

где В – матрица, обратная матрице М:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{X1} & B_{X2} & \cdots & B_{Xm} \\ B_{Y1} & B_{Y2} & \cdots & B_{Ym} \\ B_{Z1} & B_{Z2} & \cdots & B_{Zm} \\ B_{Q1} & B_{Q2} & \cdots & B_{Qm} \end{bmatrix}.$$
 (16)

Матрицы **M** и **B** уникальны для каждого самолета и набора датчиков. Если *m* не равно 4, то матрицы обратной матрице **M**, не существует, даже если все ее строки (столбцы) линейно независимы. В таком случае, умножив правую и левую часть (11) на транспонированную матрицу  $M^{T}$  и на квадратную матрицу  $(M^{T}M)^{-1}$ , получим:

$$[(\mathbf{M}^{\mathrm{T}}\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}^{\mathrm{T}}]\mathbf{M}\mathbf{e} = [(\mathbf{M}^{\mathrm{T}}\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}^{\mathrm{T}}]\mathbf{a},$$
$$\mathbf{I}\mathbf{e} = (\mathbf{M}^{\mathrm{T}}\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}^{\mathrm{T}}\mathbf{a},$$
$$\mathbf{e} = \mathbf{B}\mathbf{a},$$
(17)

где **I** – единичная матрица, **B** =  $(\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T$  – псевдообратная матрица по Муру – Пенроузу [6].

Для решения системы уравнений и расчета матрицы **M** из выражения (11) в данной работе используется операция знака косой черты программного пакета MATLAB (функция «mrdivide»). Для расчета матрицы **B** используется функция вычисления обратной матрицы «inv», для неквадратных матриц – псевдообращение матрицы по Муру – Пенроузу «pinv». Функция «inv» служит для вычисления обратных матриц методом LU-разложения. Для вычисления

псевдообратных матриц функцией «pinv» в MATLAB используется метод сингулярного разложения исходной матрицы.

# 2.2. Оценка зависимости погрешности измерений напряженности электрического поля от точности измерительной аппаратуры

Для оценки систематической погрешности измерений рассмотрим случай, когда производится вычисление одной составляющей напряженности поля по вертикальной оси на основе измерений двух электростатических флюксметров, направленных вверх и вниз, установленных в верхней и нижней точках A и B. В таком случае, если самолет в электрическом поле E несет заряд Q, величины напряженности полей в этих точках будут равны:

$$E^{A} = E^{A}_{E} + E^{A}_{Q} = k^{A}_{E}E - k^{A}_{Q}Q, (18)$$

$$E^{B} = E^{B}_{E} + E^{B}_{Q} = k^{B}_{E}E + k^{B}_{Q}Q,$$
(19)

где  $k_E^A$ ,  $k_E^B$ ,  $k_Q^A$ ,  $k_Q^B$  – коэффициенты, зависящие от геометрической формы самолета.

Обозначим коэффициенты формы летательного аппарата буквами *a*, *b*, *c* и *d*. Тогда из (19), (20) следует:

$$E = aE^A + bE^B, (20)$$

$$Q = cE^A + dE^B. (21)$$

Ранее на практике определение калибровочных коэффициентов летательных аппаратов производилось при помощи измерения потенциала на поверхности масштабных моделей, помещенных в заряженный конденсатор. Исследователи (Имянитов И.М., Чубарина Е.В) оценивали погрешности определения коэффициентов таким способом как  $\Delta a = \Delta b = 0,05$  [23, 60]. Приборная погрешность флюксметров по оценке самих авторов конструкций таких приборов также не превышает 5 % [21]. Исследователи ГГО им. А.И. Воейкова при помощи самолетов-лабораторий Як-42Д, Як-40, Ил-14, Ту-104Б, Ли-2 и др. провели множество экспериментов по изучению электрических полей, используя
масштабные модели при расчете коэффициентов формы.

В данной работе оценка погрешности выполнена на основе данных, которые были получены в ходе опытов, проведенных при помощи самолета-лаборатории Ил-14 в период с 1982 г по 1985 г. Показания датчиков фиксировались на лентах осциллографических самописцев. При снятии данных на ленте самописца погрешность по оси ординат составляет не более ±0,5 мм, что в сумме с приборной погрешностью в максимальном диапазоне измерений аппаратуры, применявшейся в опытах на самолете Ил-14, составляет 5,5 % от рассматриваемого диапазона измерений или 7575 В/м [53].

Поскольку нижний датчик установлен по направлению сверху вниз, выражения (20), (21) можно записать:

$$E = aE^A - bE^B, (22)$$

$$Q = -(cE^A + dE^B). ag{23}$$

Величина напряженности электрического поля атмосферы при сильном заряжении самолета представляет собой разность двух больших, почти равных величин. Погрешность измерений, вызванная таким малым соотношением полезного сигнала к сигналу помехи, накладывает строгие ограничения на точность определения коэффициентов формы.

Погрешность измерений напряженности электрического поля *Е* представим в следующем виде:

$$\Delta E = \Delta a E^A + \Delta b E^B + a \Delta E^A + b \Delta E^B.$$
<sup>(24)</sup>

Погрешности определения коэффициентов *a* и *b* равны  $\Delta a = \Delta b = 0,05$ , а погрешности измерений  $\Delta E^A$  и  $\Delta E^B$  являются приборными погрешностями [60].

Относительная погрешность измерений напряженности электрического поля

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta a(E^A + E^B) + a\Delta E^A + b\Delta E^B}{aE^A - bE^B}.$$
(25)

Относительная погрешность измерений заряда ЛА

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta c E^A + \Delta d E^B + c \Delta E^A + d \Delta E^B}{d E^A + d E^B}.$$
(26)

37

Для оценки влияния погрешностей определения коэффициентов на погрешность измерений напряженности поля и заряда при различных значениях зарегистрированного сигнала датчиков используем значения погрешностей и коэффициентов, ранее определенных исследователями при помощи масштабных моделей. В результате проведенных опытов исследователями были определены погрешности определения коэффициентов  $\Delta c = 0,177 \cdot 10^3$ ,  $\Delta d = 0,198 \cdot 10^3$  [23].

Рассчитанные исследователями калибровочные коэффициенты самолета Ил-14 приведены в табл. 1.

а	b	$c, \frac{\mathfrak{S.c.e.}}{\mathbf{B/cM}}$	$d, \frac{3.c.e.}{B/cM}$
0,38	0,42	$1,18 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^3$

Таблица 1 – Калибровочные коэффициенты самолета Ил-14

Зависимость относительной погрешности измерений от значений на выходе датчиков представлена на рис. 3. Относительная погрешность измерений заряда ЛА представлена на рис. 4. По вертикальной оси отложена относительная погрешность измерений. По горизонтальным осям – положения шлейфов на лентах самописцев в мм. При приблизительно равных значениях  $E^A$  и  $E^B$  погрешность измерений может составлять десятки процентов. Подобные соотношения между величинами могут возникать при значительном заряде самолета и слабых окружающих полях атмосферы. При усилении внешнего электрического поля погрешность уменьшается.

Зависимость относительной погрешности измерений напряженности поля от заряда самолета представлена на рис. 5. Для оценки погрешности был произведен расчет напряженности поля в соответствии с выражением (22) при коэффициентах, приведенных в табл. 1, по данным, полученным в результате моделирования электростатического поля величиной 10000 В/м при различных исходных значениях собственного заряда ЛА.



Рисунок 3 – Зависимость относительной погрешности измерений напряженности электрического поля от значений на выходе датчиков

Погрешность измерений напряженности поля и заряда находится в прямой зависимости не только от точности измерительного оборудования, но и от точности определения коэффициентов формы ЛА. Заряд самолета вносит существенные погрешности в измерения при использовании только классического метода определения калибровочных коэффициентов. Избежать этого можно, приняв дополнительные меры: установка избыточного числа датчиков, тщательный выбор мест установки датчиков, корректировка коэффициентов при помощи других методов.

Таким образом, необходимо отметить, что результаты опытов по измерению напряженностей электрических полей атмосферы, полученные путем определения коэффициентов формы летательных аппаратов только на их масштабных моделях, могут являться недостаточно достоверными. При проведении опытов по измерению электрических полей атмосферы необходимо использовать дополнительные методы для уточнения калибровочных коэффициентов.



Рисунок 4 – Зависимость относительной погрешности измерений заряда летательного аппарата от значений на выходе датчиков



Рисунок 5 – Зависимость относительной погрешности измерений напряженности

электрического поля от заряда самолета

### 2.3. Обобщенный алгоритм и методика измерения напряженности

### электрического поля и заряда летательного аппарата

С целью выработки рекомендаций по корректировке мест установки датчиков на воздушном судне, расчета матрицы калибровочных коэффициентов и их уточнения разработан следующий обобщенный алгоритм, включающий в себя этап компьютерного математического моделирования.

Входные данными алгоритма:

- тип воздушного судна летающей лаборатории;
- предполагаемый состав комплекса аппаратуры и оборудования самолеталаборатории;
- предполагаемая компоновка измерительной аппаратуры самолеталаборатории и допустимые зоны размещения приборов для измерения напряженности поля.

Предлагаемая методика, схема которой представлена на рис. 6, включает в себя следующие этапы:

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

Выходным данными алгоритма являются места установки датчиков и матрица калибровочных коэффициентов.



Рисунок 6 – Общая схема алгоритма измерения напряженности поля и заряда ЛА Использованные программные продукты

Для определения калибровочных коэффициентов в рамках данной работы осуществлялись компьютерные расчеты электрического поля. Моделирование электростатического поля осуществлялось при помощи специализированного программного обеспечения ANSYS Electromagnetics Suite. ANSYS – универсальная программная система анализа методом конечных элементов, которая является широко используемой в сфере автоматизированных инженерных расчётов, применяется для решения линейных и нелинейных, стационарных и

нестационарных пространственных задач электростатики, электродинамики, механики жидкости и газа, теплопередачи, задач деформации твёрдого тела и механики конструкций.

ANSYS Для построения моделей электрического поля пакете В Electromagnetics Suite использовался электростатический решатель ANSYS Maxwell, задача которого в этом программном пакете заключается в расчете статических, гармонических электромагнитных и электрических полей, а также переходных процессов в полевых задачах, используя метод конечных элементов. Модели самолетов (Ил-14, Як-42Д, БпЛА средней дальности) были разработаны трехмерного при помощи программ для моделирования И систем автоматизированного проектирования Dassault Systèmes SOLIDWORKS, Autodesk 3ds Max, Autodesk AutoCAD.

### Разработка моделей летательных аппаратов

Модели, использованные в данной работе, изготавливались на основе схем компоновок летающих лабораторий, предоставленных их разработчиками, а также чертежей и моделей, доступных в открытых источниках. Модели самолетов Ил-14, Як-42Д, БпЛА изображены на рис. 8, 19, 29.

Одним из критериев при выборе оптимального расположения датчиков на борту летательного аппарата является положение электрических нейтралей [32]. Для определения положения электрических нейтралей модель самолета помещается в однородное внешнее поле, направленное вдоль одной из осей связанной с самолетом системы координат, и строится картина распределения наведенного полем заряда на поверхности летательного аппарата. Электрической нейтралью является линия на поверхности, вдоль которой заряд равен нулю.

Для калибровочных коэффициентов осуществляется определения моделирование электростатического поля, окружающего самолет. После вычисления значений напряженностей электрического поля в местах фактической планируемой осуществляется или установки датчиков расчет матриц калибровочных коэффициентов в соответствии с формулами (15) или (17).

Матрицы калибровочных коэффициентов, полученные по результатам

43

моделирования, в дальнейшем были использованы для анализа данных самолетных экспериментов.

#### Моделирование электрического поля

Электростатический решатель Electrostatic Solver системы ANSYS Maxwell предназначен для решения трехмерного дифференциального уравнения Пуассона в частных производных для неизвестного электрического потенциала  $\Phi$ :

$$\nabla(\varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla \Phi) = -\rho_{\nu},\tag{27}$$

где  $\Phi(x, y, z)$  – электрический потенциал,  $\varepsilon_r(x, y, z)$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\rho_v(x, y, z)$  – объемная плотность электрического заряда [96].

Во время расчетов принимались следующие допущения: объекты являются неподвижными, электромагнитные величины не изменяются во времени, токов в проводниках нет. Проводники полагаются идеальными и эквипотенциальными. Моделируемые объекты (летательные аппараты) являются объемными моделями равномерно заряженных металлических тел. Граничные условия задаются электрическими потенциалами на границах модельной области.

Решение уравнения Пуассона выполняется при помощи метода конечных элементов [12]. Одним из недостатков метода конечных элементов является зависимость точности полученного решения от размерности аппроксимирующей сетки. Для достижения заданного критерия точности в ANSYS Maxwell применяется адаптивный подход, автоматически повышающий плотность сетки в наиболее чувствительных к этому областях. Схема процесса вычислений представлена на рис. 7.

После выполнения расчета электрического потенциала в модельной области в соответствии с уравнениями Максвелла вычисляется значение вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$ :

$$\vec{E} = -\nabla \Phi. \tag{28}$$

44



Рисунок 7 – Схема работы электростатического решателя при адаптивном подходе к вычислениям

Поверхностная плотность заряда *Q* на границе двух сред рассчитывается следующим образом:

$$Q = \left[ \left( \varepsilon_1 \vec{E}_1 \right) - \left( \varepsilon_2 \vec{E}_2 \right) \right] \times \vec{n}, \tag{29}$$

где  $\vec{E}_1$ ,  $\varepsilon_1$  – электрическое поле и относительная диэлектрическая проницаемость среды по одну сторону от границы,  $\vec{E}_2$ ,  $\varepsilon_2$  – электрическое поле и относительная диэлектрическая проницаемость среды по другую сторону от границы, n – вектор нормали к поверхности.

Значения напряженности поля в местах установки датчиков, полученные в ходе компьютерного моделирования при различных граничных значениях напряженности электрического поля, используются для расчета матриц калибровочных коэффициентов.

### Рекомендации по расположению датчиков

Основными способами снижения погрешностей измерения напряженности электрического поля с летательных аппаратов можно считать [32]:

1) выбор наиболее благоприятного расположения датчиков;

2) повышение точности и надежности датчиков напряженности поля;

3) повышение достоверности расчета коэффициентов формы.

При выборе места расположения датчиков напряженности поля необходимо учитывать факторы, ограничивающие места расположения приборов напряженности поля на самолете, например, близость силовых элементов конструкции, деталей системы управления, топливных баков, антенн и других датчиков.

При размещении датчиков на летательном аппарате следует придерживаться следующих рекомендаций [56]:

1) использовать не менее четырех, а лучше шесть и более датчиков;

2) располагать датчики на пересечениях электрических нейтралей;

3) располагать датчики на плоских частях фюзеляжа;

4) располагать датчики вдали от непроводящих элементов конструкции, двигателей, подвижных частей летательного аппарата, заостренных или выступающих частей, других датчиков, антенн и прочего радиоэлектронного оборудования;

5) располагать датчики вдоль всех трех осей связанной с самолетом системы координат.

Уточнение матрицы калибровочных коэффициентов при помощи специальных полетов

Сложность моделирования различных антенн и обтекателей датчиков, наличие ионизированных струй от двигателей реактивных самолетов и других источников, изменяющих эквивалентную электрическую форму и емкость самолета, могут стать причиной существенной разницы между масштабной или электронной моделью и самолетом-лабораторией в полете. При определенных условиях может потребоваться дополнительное уточнение матрицы калибровочных коэффициентов путем проведения специальных полетов при строго детерминированных параметрах полета и атмосферы. Методики выполнения подобных полетов подробно описаны в работах Михайловского Ю.П. [32], Buguet M. и др. [71], Koshak W.J. и др. [87].

### 2.4. Результаты моделирования и расчет калибровочных коэффициентов самолета Ил-14

Ил-14, ближнемагистральный поршневой пассажирский самолет, представляет собой однокилевой низкоплан с нормальной схемой, оснащенный двумя поршневыми двигателями мощностью 1950 л.с. Имеет длину 21,3 м, размах крыла 31,7 м.

Самолет-лаборатория Ил-14 был оснащен большим количеством передового измерительного оборудования: комплексом приборов ПНП, прибором для измерения водности облаков ДИВО, ультразвуковым анемометром БОРТ, ИК-радиометром ИТ-3. Самолет использовался ГГО им. А.И. Воейкова при проведении научно-исследовательских проектов в период с 1977 г по 1990 г [17].

В качестве материала корпуса для модели самолета Ил-14 был выбран авиационный алюминий с электропроводностью 3,8·10<sup>7</sup> См/м и диэлектрической проницаемостью 1. Модель самолета Ил-14 изображена на рис. 8.

Здесь и далее на диаграммах распределения электрические поля изображены линиями различного цвета в зависимости от величины вектора напряженности поля в данной точке независимо от его направления. Линии расположены тем чаще, чем сильнее неоднородности в данной части модельной области. Для наглядности не показаны линии, соответствующие напряженностям поля величиной менее 200 В/м. В связи с крайне высокой концентрацией отрицательных И положительных зарядов на деталях с минимальными радиусами закругления (нос, хвост, законцовки и задние кромки крыла и оперения) на диаграммах распределения поверхностного заряда цветовые диапазоны условной окраски соответствуют сокращенному диапазону значений величин заряда. Поскольку модели фактически представляют собой набор полигонов, вершин и граней, чтобы избежать аномалий в значениях величин плотности поверхностного заряда и напряженности электрического поля у вершин и острых углов ребер, максимальные и минимальные значения приведены с осреднением по площади нескольких соседних полигонов.



Рисунок 8 – Модель самолета Ил-14

Модель самолета Ил-14, заряженная до величины  $Q = 10^{-5}$  Кл, помещенная в среду свободную от внешнего электрического поля, изображена на рис. 9. Максимальное значение заряда на поверхности самолета составило 130 Кл $\cdot 10^{-9}$ /м<sup>2</sup>. Максимальное величина напряженности поля – более 15000 В/м. Здесь и далее – E (В/м) – напряженность электрического поля; *QSurf* (Кл $\cdot 10^{-9}$ /м<sup>2</sup>) – поверхностная плотность заряда.

Распределение заряда по поверхности и искажение электрического поля вокруг незаряженной модели самолета Ил-14, помещенной в вертикальное электрическое поле напряженностью 1000 В/м, изображены на рис. 10, 11.

Максимальное значение поверхностного заряда составило 90 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на нижней поверхности фюзеляжа, минимальное значение – минус 150 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на верхней кромке киля. Максимальное значение напряженности поля составило более 12000 В/м.



Рисунок 9 – Искажение электрического поля моделью заряженного самолета Ил- $14 (Q = 10^{-5} \text{ Kn})$  в условиях отсутствия внешнего электрического поля



Рисунок 10 – Распределение заряда на поверхности модели незаряженного самолета Ил-14 в вертикальном электрическом поле  $E_Z = 1000$  В/м



Рисунок 11 – Искажение электрического поля моделью незаряженного самолета Ил-14 в вертикальном электрическом поле  $E_Z = 1000$  B/м

На рис. 12, 13 изображены распределение заряда по поверхности и искажение электрического поля вокруг незаряженной модели самолета Ил-14, помещенной в боковое электрическое поле напряженностью 1000 В/м. Максимальное и минимальное значения поверхностного заряда составили 330 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на законцовке правого крыла и минус 330 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на законцовке левого крыла соответственно. Максимальное значение напряженности поля составило более 35000 В/м.

Искажение электрического поля моделью незаряженного самолета Ил-14 и распределение заряда на ее поверхности в продольном электрическом поле напряженностью 1000 В/м изображены на рис. 14, 15. Максимальное значение поверхностного заряда составило 450 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на хвосте, минимальное значение – минус 150 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на носу. Максимальное значение напряженности поля составило более 20000 В/м.



Рисунок 12 – Распределение заряда на поверхности модели незаряженного самолета Ил-14 в боковом электрическом поле  $E_Y = 1000$  В/м



Рисунок 13 – Искажение электрического поля моделью незаряженного самолета Ил-14 в боковом электрическом поле  $E_Y = 1000$  B/м



Рисунок 14 – Распределение заряда на поверхности модели незаряженного самолета Ил-14 в продольном электрическом поле  $E_X = 1000$  В/м



Рисунок 15 – Искажение электрического поля моделью незаряженного самолета Ил-14 в продольном электрическом поле *E*<sub>X</sub> = 1000 B/м

В табл. 2 приведены наибольшее значение напряженности электрического поля, а также максимальные и минимальные величины поверхностной плотности заряда в зависимости от направления приложенного электрического поля.

Таблица 2 – Максимальные и минимальные величины напряженности электрического поля и поверхностной плотности заряда в зависимости от направления приложенного электрического поля величиной 1000 В/м

Направление	Поверхностная п Кл·1(	лотность заряда, ) <sup>-9</sup> /м <sup>2</sup>	Максимальная напряженность	
электрического поля	максимальная	минимальная	электрического поля, В/м	
Продольное ( $E_X$ )	450	-150	20000	
Боковое ( $E_Y$ )	330	-330	35000	
Вертикальное ( <i>E</i> <sub>Z</sub> )	90	-150	12000	

Результаты определения положения электронейтралей на самолете Ил-14 изображены на рис. 16.

В данной работе с целью анализа методики расчета калибровочных матриц рассмотрены следующие четыре варианта расположения датчиков (рис. 17). В первом случае, соответствующем фактическому расположению датчиков на самолете-лаборатории Ил-14, применявшейся ГГО им. А.И. Воейкова, приборы напряженности поля располагались сверху, снизу, на центральной части фюзеляжа слева и в хвосте. Во втором случае – сверху, снизу, на законцовке левого крыла, и в хвостовой нижней части. В третьем случае приборы располагались сверху, слева, в носовой нижней части и в хвостовой нижней части. В третьем случае приборы располагались сверху, слева, в носовой нижней части и в хвостовой нижней части и в хвостовой нижней части. В четвертом случае рассматривалась система, включающая в себя только два датчика, направленные вверх и вниз. Датчики по возможности располагались прямо на электрических нейтралях.



Рисунок 16 – Расположение электрических нейтралей на поверхности самолета Ил-14: а) вид спереди, б) вид сзади, в) вид сверху, г) вид снизу, д) вид слева



Рисунок 17 – Схемы расположения датчиков на самолете Ил-14

Особенностью установки хвостового датчика ввиду отсутствия технической возможности установки его прямо в хвостовой части самолета является специальный обтекатель, выступающий за пределы фюзеляжа. Так как наличие обтекателя само по себе существенным образом искажает электрическое поле, в месте установки датчика необходимо проводить моделирование с учетом этого

обтекателя. Метод компьютерного моделирования позволяет моделировать такие обтекатели. Часть модели самолета с обтекателем хвостового датчика представлена на рис. 18.



Рисунок 18 – Модель обтекателя хвостового датчика на самолете Ил-14

Результаты расчета матриц калибровочных коэффициентов приведены в табл. 3-6.

Таблица 3 – Матрица калибровочных коэффициентов системы измерителей (схема расположения I)

Компоненты	Значениях выходных сигналов измерителей			
электрического поля и заряд	$a_1$	$a_2$	<i>a</i> <sub>3</sub>	$a_4$
$E_X$	-0,181	-0,259	0	0,051
$E_Y$	0,945	0,135	-2,094	0
$E_Z$	-0,245	0,319	0	0
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	-2,851	-3,341	0	0

Таблица 4 – Матрица калибровочных коэффициентов системы измерителей (схема расположения II)

Компоненты	Значениях выходных сигналов измерителей				
электрического поля и заряд	$a_1$	$a_2$	<i>a</i> <sub>3</sub>	$a_4$	
$E_X$	-0,081	-0,500	0	0,327	
$E_Y$	0,130	0,168	-0,039	-0,015	
$E_Z$	-0,245	0,319	0	0	
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	-2,851	-3,341	0	0	

Таблица 5 – Матрица калибровочных коэффициентов системы измерителей (схема расположения III)

Компоненты	Значениях выходных сигналов измерителей			
электрического поля и заряд	<i>a</i> <sub>1</sub>	<i>a</i> <sub>2</sub>	<i>a</i> <sub>3</sub>	$a_4$
$E_X$	-0,029	-0,236	0	0,194
$E_Y$	0,931	0,064	-2,094	0,036
$E_Z$	-0,278	0,150	0	0,085
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	-2,236	-1,584	0	-0,897

Таблица 6 – Матрица калибровочных коэффициентов системы измерителей (схема расположения IV)

Компоненты электрического поля и заряд	Значениях сигналов и	ниях выходных 10в измерителей		
	$a_1$	$a_2$		
$E_Z$	-0,245	0,319		
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	-2,851	-3,341		

Из-за сильных полей, наведенных зарядом самолета, показания датчиков, установленные в обтекателях на крыле и в хвосте, определяются в основном зарядом самолета и слабо реагируют непосредственно на боковую и продольную

составляющие поля. Величины коэффициентов третьей схемы расположения датчиков наиболее ярко выражены по отношению именно к их измеряемым основным направлениям компонент вектора напряженности, что говорит о том, что третий вариант компоновки является наиболее удачным из рассмотренных.

Для сравнения в табл. 7 приведены значения калибровочных коэффициентов, определенные ранее методом масштабных моделей, взятые с соответствующими знаками [23].

Таблица 7 – Калибровочная матрица системы измерителей (схема расположения IV), определенная методом масштабных моделей

Компоненты электрического поля и заряд	Значениях сигналов из	к выходных измерителей		
	$a_1$	$a_2$		
$E_Z$	-0,38	0,42		
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	-3,936	-4,403		

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 [32].

# 2.5. Результаты моделирования и расчет калибровочных коэффициентов самолета Як-42Д

Самолет Як-42Д является ближнемагистральным трехдвигательным пассажирским самолетом с низко расположенным стреловидным крылом и однокилевым Т-образным высоко расположенным стабилизатором. Имеет длину 36,38 м, размах крыла 34,88 м. Оснащен тремя турбовентиляторными двигателями, максимальной тяга каждого двигателя – 6500 кгс.

Летающая лаборатория Як-42Д «Росгидромет» создавалась в период с 2010 г по 2013 г. Самолет оборудован множеством программно-аппаратных комплексов, обеспечивающих измерение и регистрацию навигационных параметров полета и термодинамических параметров атмосферы, газового и аэрозольного состава атмосферы, излучения В атмосфере, радиационных И теплофизических подстилающей поверхности, радиоактивного характеристик загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности, микроструктуры облаков и осадков, атмосферного электричества [8]. Программно-аппаратный комплекс для измерения атмосферно-электрических характеристик включает в себя 6 самолетных приборов (ПНП) для измерения напряженности поля, активный компенсатор заряда самолета, прибор для измерения полярных электрических проводимостей.

В качестве материала для модели самолета Як-42Д также был использован авиационный алюминий. Модель самолета Як-42Д изображена на рис. 19.



Рисунок 19 – Модель самолета Як-42Д

На рис. 20 изображена модель самолета Як-42Д, заряженная до величины  $Q = 10^{-5}$  Кл, помещенная в среду свободную от внешнего электрического поля. Максимальное значение заряда на поверхности самолета составило 180 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup>. Максимальная величина напряженности поля – более 20000 В/м.



Рисунок 20 – Искажение электрического поля моделью сильно заряженного самолета Як-42Д ( $Q = 10^{-5}$  Кл) в условиях отсутствия внешнего электрического поля

Распределение заряда по поверхности и искажение электрического поля вокруг незаряженной модели самолета Як-42Д, помещенной в вертикальное электрическое поле напряженностью 1000 В/м, изображены на рис. 21, 22. Максимальное значение поверхностного заряда составило 30 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на нижней поверхности фюзеляжа, минимальное значение – минус 100 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на верхней кромке киля. Максимальное значение напряженности поля составило более 10000 В/м.

На рис. 23, 24 изображены распределение заряда по поверхности и искажение электрического поля вокруг незаряженной модели самолета Як-42Д, помещенной в боковое электрическое поле напряженностью 1000 В/м. Максимальное и минимальное значения поверхностного заряда составили 500 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на законцовке правого крыла и минус 500 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на законцовке левого крыла соответственно. Максимальное значение напряженности поля составило более 50000 В/м.



Рисунок 21 – Распределение заряда на поверхности модели незаряженного самолета Як-42Д в вертикальном электрическом поле  $E_Z = 1000$  В/м



Рисунок 22 – Искажение электрического поля моделью незаряженного самолета Як-42Д в вертикальном электрическом поле  $E_Z = 1000$  В/м



Рисунок 23 – Распределение заряда на поверхности модели незаряженного самолета Як-42Д в боковом электрическом поле *E*<sub>Y</sub> = 1000 В/м



Рисунок 24 – Искажение электрического поля моделью незаряженного самолета Як-42Д в боковом электрическом поле *E*<sub>Y</sub> = 1000 В/м

На рис. 25, 26 изображены распределение заряда по поверхности и искажение электрического поля вокруг незаряженной модели самолета Як-42Д, помещенной в продольное электрическое поле напряженностью 1000 В/м. Максимальное значение поверхностного заряда составило 300 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на хвосте, минимальное значение – минус 350 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на носу. Максимальное значение напряженности поля составило более 30000 В/м.

В табл. 8 приведены наибольшее значение напряженности электрического поля, а также максимальные и минимальные величины поверхностной плотности заряда в зависимости от направления приложенного электрического поля.



Рисунок 25 – Распределение заряда на поверхности модели незаряженного самолета Як-42Д в продольном электрическом поле *E*<sub>X</sub> = 1000 В/м



Рисунок 26 – Искажение электрического поля моделью незаряженного самолета Як-42Д в продольном электрическом поле *E*<sub>X</sub> = 1000 В/м

Таблица 8 – Максимальные и минимальные величины напряженности электрического поля и поверхностной плотности заряда в зависимости от направления приложенного электрического поля величиной 1000 В/м

Направление	Поверхностная п Кл·1(	лотность заряда, ) <sup>-9</sup> /м <sup>2</sup>	Максимальная напряженность	
электрического поля	максимальная	минимальная	электрического поля, В/м	
Продольное ( $E_X$ )	300	-350	30000	
Боковое (Еу)	500	-500	50000	
Вертикальное ( <i>E</i> <sub>Z</sub> )	30	-100	10000	

На рис. 27 изображено полученное в результате моделирования положение электрических нейтралей самолета Як-42Д.



Рисунок 27 – Расположение электрических нейтралей на поверхности самолета Як-42Д: а) вид спереди, б) вид сзади, в) вид сверху, г) вид снизу, д) вид слева

В работе рассмотрены два варианта работы системы измерителей на самолете Як-42Д: с шестым датчиком, установленным в задней верхней части фюзеляжа под значительным углом к горизонтальной плоскости, и без шестого датчика. Расположение датчиков на самолете Як-42Д представлено на рис. 28.



Рисунок 28 – Расположение датчиков на самолете-лаборатории Як-42Д

Результаты расчетов матриц калибровочных коэффициентов приведены в табл. 9, 10.

Компоненты	3	Значениях выходных сигналов измерителей				
электрического поля и заряд	$a_1$	$a_2$	<i>a</i> <sub>3</sub>	$a_4$	$a_5$	$a_6$
$E_X$	-0,149	-0,192	0,032	0,030	0,263	0,176
$E_Y$	-0,014	-0,001	-0,453	0,463	-0,004	-0,015
$E_Z$	-0,083	0,165	-0,040	-0,038	0,092	-0,130
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	-0,643	-0,835	1,433	1,35	4,925	3,449

Таблица 9 – Калибровочная матрица системы измерителей (датчики 1-6)

Таблица 10 – Калибровочная матрица системы измерителей (датчики 1-5)

Компоненты	Зна	Значениях выходных сигналов измерителей			
электрического поля и заряд	$a_1$	$a_2$	<i>a</i> <sub>3</sub>	$a_4$	<i>a</i> <sub>5</sub>
$E_X$	-0,071	-0,292	0,115	0,109	0,333
$E_Y$	-0,020	0,007	-0,460	0,456	-0,010
$E_Z$	-0,141	0,239	-0,102	-0,096	0,040
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	0,891	-2,786	3,072	2,894	6,311

Из полученных данных можно сделать вывод, что измерение продольной составляющей поля без датчиков, направленных непосредственно по полету или против полета, возможно и осуществимо, а установка одного дополнительного датчика №6, направленного вверх и влево, за счет дополнительной избыточности может повысить точность измерений.

### Выводы к главе 2

1. С целью анализа методов расчета калибровочных коэффициентов было выполнено моделирование искажений электрических полей фюзеляжем и собственным зарядом самолетов-лабораторий Ил-14 и Як-42Д. Проведенный применявшиеся ранее многочисленных анализ показал, что В ходе предшествующих определения матриц калибровочных опытов методы коэффициентов нуждаются в существенной доработке, а также требуют

использования комплексного подхода к изначальному расчету калибровочных коэффициентов и дальнейшей их корректировке, поскольку сами по себе эти подходы не могут обеспечить требуемую точность и достоверность измерений.

2. Впервые осуществлен расчет методом компьютерного математического моделирования калибровочных коэффициентов датчиков, использованных впоследствии на практике для анализа данных летных экспериментов самолетов-лабораторий.

### Глава 3. Оценка возможности применения перспективных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа средней дальности для исследований атмосферного электричества

# 3.1. Особенности использования беспилотных летательных аппаратов для исследований атмосферного электричества

Препятствием для широкомасштабного применения пилотируемой авиации с целью исследования физических свойств атмосферы являются крайне высокие затраты на оборудование и эксплуатацию самолетов-лабораторий. По сравнению с беспилотная пилотируемой авиацией авиация обеспечивает следующие большая преимущества: всепогодное круглогодичное применение, полета, экономическая выгода. В настоящее продолжительность время беспилотная авиация развивается крайне высокими темпами, в перспективе она сможет быть использована во многих отраслях хозяйственной деятельности человека. Беспилотная авиация уже сейчас применяется при решении задач предупреждения опасных явлений погоды, стихийных бедствий, мониторинга состояния окружающей среды [2, 3].

Возможность БпЛА применения для измерения напряженности электрического поля атмосферы оценивалась на примере средневысотного беспилотного летательного аппарата большой продолжительности полета класса MALE (Medium Altitude Long Endurance). Максимальная высота полета более 8000 м, большой радиус применения (150-250 км), продолжительность полета более 24 ч позволят подобным БпЛА осуществлять продолжительные непрерывные измерения напряженности электрического поля в широком диапазоне высот, в облачности различных типов на всех стадиях ее развития, в том числе и при неблагоприятных погодных условиях. Максимальная масса полезной нагрузки более 200 кг позволит использовать БпЛА среднего типа как платформу не только для измерений электрических характеристик атмосферы, но и как самолет-лабораторию для исследования и других физических и микрофизических свойств атмосферы и облаков.

67

### 3.2. Результаты моделирования и расчет калибровочных коэффициентов

### БпЛА

В настоящее время при проектировании БпЛА в качестве материалов для изготовления планера активно используются композитные материалы, такие как углепластик и стеклопластик. Углепластик, из которого изготавливают основную часть фюзеляжа, обладает небольшой удельной электропроводностью и не является диэлектриком.

Фюзеляж БпЛА класса MALE, как правило, представляет собой планер нормальной аэродинамической компоновки, прямое крыло размахом 8 и более метров и хвостовое оперение V-образной формы, оснащен поршневым двигателем мощностью 100-150 л.с. Модель БпЛА класса MALE изображена на рис. 29. В качестве материала для модели БпЛА использовался углепластик с заданной диэлектрической проницаемостью 3,6 и анизотропной электропроводностью 2000 См/м [63] (для сравнения удельная электропроводность алюминия составляет 3,8·10<sup>7</sup> См/м).



Рисунок 29 – Модель БпЛА

Модель БпЛА, заряженного до величины  $Q = 10^{-6}$  Кл, помещенная в среду свободную от внешнего электрического поля, изображена на рис. 30. Максимальное значение заряда на поверхности самолета составило 80 Кл $\cdot 10^{-9}$ /м<sup>2</sup>. Максимальная величина напряженности поля – более 9000 В/м.



Рисунок 30 – Искажение электрического поля моделью сильно заряженного БпЛА  $(Q = 10^{-6} \text{ Kn})$  в условиях отсутствия внешнего электрического поля

Распределение заряда по поверхности и искажение электрического поля вокруг незаряженной модели БпЛА, помещенной в вертикальное электрическое поле напряженностью 1000 В/м, изображены на рис. 31, 32. Максимальное значение поверхностного заряда составило 90 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на нижнем обтекателе антенны бортового комплекса связи, минимальное значение – минус 180 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на верхней кромке килей. Максимальное значение напряженности поля составило более 14000 В/м.

На рис. 33, 34 изображены распределение заряда по поверхности и искажение электрического поля вокруг незаряженной модели БпЛА, помещенной в боковое электрическое поле напряженностью 1000 В/м. Максимальное и минимальное значения поверхностного заряда составили 450 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на законцовке правого крыла и минус 450 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на законцовке левого крыла соответственно. Максимальное значение напряженности поля составило более 50000 В/м.



Рисунок 31 – Распределение заряда на поверхности модели незаряженного БпЛА в вертикальном электрическом поле  $E_Z = 1000$  В/м



Рисунок 32 – Искажение электрического поля моделью незаряженного БпЛА в вертикальном электрическом поле  $E_Z = 1000$  В/м



Рисунок 33 – Распределение заряда на поверхности модели незаряженного БпЛА в боковом электрическом поле *E*<sub>Y</sub> = 1000 B/м



Рисунок 34 – Искажение электрического поля моделью незаряженного БпЛА в боковом электрическом поле  $E_Y = 1000$  В/м

Распределение заряда по поверхности и искажение электрического поля вокруг незаряженной модели БпЛА, помещенной в продольное электрическое поле напряженностью 1000 В/м, изображены на рис. 35, 36. Максимальное значение поверхностного заряда составило 200 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на хвосте, минимальное значение – минус 350 Кл·10<sup>-9</sup>/м<sup>2</sup> на носу. Максимальное значение напряженности поля составило более 30000 В/м.

Характер распределения электрического поля и поверхностного заряда у модели БпЛА повторяет распределение у других показанных ранее моделей. Как и у обычных самолетов, в случае заряжения электрическое поле непосредственно вблизи БпЛА будет представлять собой комбинацию полей, обусловленных и внешним полем, и собственным зарядом.



Рисунок 35 – Распределение заряда на поверхности модели незаряженного БпЛА в продольном электрическом поле *E*<sub>X</sub> = 1000 В/м


Рисунок 36 – Искажение электрического поля вокруг модели незаряженного БпЛА в продольном электрическом поле  $E_X = 1000$  В/м

В табл. 11 приведены наибольшее значение напряженности электрического поля, а также максимальные и минимальные величины поверхностной плотности заряда в зависимости от направления приложенного электрического поля.

Таблица 11 – Максимальные и минимальные величины напряженности электрического поля и поверхностной плотность заряда в зависимости от направления приложенного электрического поля величиной 1000 В/м

Направление	Поверхностная п Кл·1(	Поверхностная плотность заряда, Кл·10 <sup>-9</sup> /м <sup>2</sup>		
электрического поля	максимальная	минимальная	электрического поля, В/м	
Продольное ( $E_X$ )	200	-350	30000	
Боковое (Еу)	450	-450	50000	
Вертикальное ( $E_Z$ )	90	-180	14000	

Расположение электрических нейтралей на поверхности БпЛА изображено на рис. 37.



Рисунок 37 – Расположение электрических нейтралей на поверхности БпЛА: а) вид спереди, б) вид сзади, в) вид сверху, г) вид снизу, д) вид справа.

Рассмотренные варианты компоновки датчиков на борту БпЛА изображены на рис. 38. Ввиду невозможности размещения измерителя, направленного вдоль по полету, в носу или против полета в хвосте были рассмотрены варианты с установкой датчика для измерения продольной составляющей напряженности электрического поля, направленного против полета в обтекателе, который установлен под крылом. В одном из вариантов измерители размещались сверху и снизу в центральной части фюзеляжа, на левом борту и в обтекателе под крылом. В другом варианте – сверху, в обтекателе под крылом, на левом борту и снизу в носовой части фюзеляжа. В третьем – датчики располагались сверху и снизу в центральной части фюзеляжа, на левом борту и в нижней носовой части фюзеляжа. Матрицы калибровочных коэффициентов приведены в табл. 12-14.



Рисунок 38 – Схемы расположения датчиков на БпЛА

Таблица 12 – Калибровочная матрица системы измерителей (схема расположения I)

Компоненты	Значениях выходных сигналов измерителей					
электрического поля и заряд	$a_1$	$a_2$	<i>a</i> <sub>3</sub>	$a_4$		
$E_X$	-88,488	-17,840	4,609	109,543		
$E_Y$	3,026	0,235	0	-3,915		
$E_Z$	-0,210	0,503	0	0		
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	-2,371	-2,159	0	0		

Таблица 13 – Калибровочная матрица системы измерителей (схема расположения II)

Компоненты	Значениях выходных сигналов измерителей					
электрического поля и заряд	$a_1$	<i>a</i> <sub>3</sub>	$a_4$	$a_5$		
$E_X$	-2,531	0,146	3,476	-0,281		
$E_Y$	1,893	0,059	-2,517	0,004		
$E_Z$	-2,631	0,126	2,988	0,008		
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	8,031	-0,540	-12,836	-0,034		

Таблица 14 – Калибровочная матрица системы измерителей (схема расположения III)

Компоненты	Значениях выходных сигналов измерителей					
электрического поля и заряд	$a_1$	$a_2$	$a_4$	$a_5$		
$E_X$	0,286	0,585	0	-0,290		
$E_Y$	3,026	0,235	-3,915	0		
$E_Z$	-0,210	0,503	0	0		
<i>Q</i> , Кл·10 <sup>-9</sup> /В·м	-2,371	-2,159	0	0		

Из-за большой напряженности поля, наведенной собственным зарядом беспилотного летательного аппарата, установленный в обтекателе под крылом датчик реагировал на вертикальную и боковую составляющую поля сильнее, чем на продольную. В то же время величины коэффициентов третьей схемы расположения датчиков имеют наименьший разброс, что говорит о том, что третий вариант компоновки является наиболее оптимальным из рассмотренных.

## 3.3. Сравнение результатов моделирования самолетов разных типов

Значения максимальной и минимальной поверхностных плотностей заряда и максимальной величины напряженности поля в зависимости от направления приложенного электрического поля величиной 1000 В/м всех трех рассмотренных

моделей летательных аппаратов представлены в табл. 15.

Таблица 15 – Поверхностная плотность заряда и напряженность электрического поля в зависимости от направления приложенного электрического поля величиной 1000 В/м

Направление	Поверхностная п Кл·1(	верхностная плотность заряда, Кл·10 <sup>-9</sup> /м <sup>2</sup>				
электрического поля	максимальная	минимальная	электрического поля, В/м			
Продольное (Е <sub>х</sub> )	450	-150	20000			
Боковое (Еу)	330 -330		35000			
Вертикальное ( <i>E</i> <sub>Z</sub> )	90 -150		12000			
	Як-42)	д				
Продольное (Е <sub>х</sub> )	300	-350	30000			
Боковое (Еу)	500	-500	50000			
Вертикальное ( <i>E</i> <sub>Z</sub> )	30	-100	10000			
	БпЛА класса MALE					
Продольное (Е <sub>х</sub> )	200	-350	30000			
Боковое (Еу)	450	-450	50000			
Вертикальное ( <i>E</i> <sub>Z</sub> )	90	-180	14000			

Как видно из данных, представленных в таблице, несмотря на различия в размерах и материалах данных 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.

Из сравнения величин коэффициентов калибровочных матриц (табл. 3-7, 9, 10, 12-14) подтверждается вывод о том, что место пересечения электронейтралей в средней части центроплана наиболее подходит для установки датчиков,

расположенных в вертикальном и боковом направлениях. При этом оптимальным является расположение датчиков попарно, направленных в противоположных направлениях. В свою очередь расположение датчиков, измеряющих продольную составляющую напряженности электрического поля, может быть сопряжено с неразрешимыми трудностями. Искажения электрического поля в районе носа, хвоста, передних и задних кромок оперения самолета велики, а установка там обтекателей с датчиками часто невозможна технически.

## Выводы к главе 3

1. Для исследования электрических характеристик атмосферы могут быть использованы БпЛА, изготовленные с применением композитных материалов.

2. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования искажений электрического поля пилотируемыми и беспилотными самолетами. Этот анализ показал, что предлагаемая методика моделирования электростатических полей может применяться при проектировании самолетов-лабораторий на основе БпЛА.

3. Приведены примеры выбора схемы расположения приборов напряженности поля на борту БпЛА, расчета их калибровочных матриц.

## Глава 4. Исследование напряженности электрического поля и заряда самолета в облаках различных форм

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

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

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

Предоставленные в прошлом данные о напряженности электрических полей в основном были получены с использованием устаревших методов определения калибровочных коэффициентов и могли иметь погрешности, достигающие десятков, а при определенных условиях и сотен процентов. В настоящей работе приводятся в том числе и уточненные результаты, полученные в соответствии с обновленными методиками расчета.

## Описание эксперимента

Данные для анализа были получены в ходе научно-исследовательского полета, проведенного при выполнении ГГО им. А.И. Воейкова нескольких научных проектов в период с 1977 г по 1990 г при помощи самолета-лаборатории Ил-14. Исследуемые данные были получены 19 июля 1984 г.

Основу комплекса измерительных приборов составляли приборы напряженности поля (флюксметры), разработанные в ГГО. Флюксметры позволяли измерять напряженность поля величиной до 250 кВ/м при относительной погрешности не более 5 % [47]. В связи с тем, что данные были записаны только для двух датчиков напряженности поля, определялась только вертикальная

составляющая напряженности поля, при этом были использованы рассчитанные автором калибровочные коэффициенты, показанные ранее.

Измерения температуры выполнялись с помощью ИК радиометра ИТ-3, принимающего излучение в области полосы поглощения водяного пара с центром 6,3 мкм [43]. Для анализа в работе используется такая величина как «перегрев» облака, представляющая из себя разность радиационной температуры в облаке относительно осредненной температуры безоблачного пространства. Погрешность измерений не превышала 0,1°C.

Водность фиксировалась с помощью прибора ДИВО [47]. Прибор обеспечивал диапазон измерения водности от 0,1 г/м<sup>3</sup> до 3 г/м<sup>3</sup> с погрешностью не более 10 %.

Скорости восходящих и нисходящих потоков измерялись с помощью ультразвукового анемометра БОРТ [47]. Анемометр обеспечивал измерения в диапазоне скоростей потоков от минус 20 м/с до 20 м/с с погрешностью не более 0,5 м/с.

19 июля 1984 г в Ленинградской области при помощи самолета-лаборатории Ил-14 была исследована группа мощных кучевых облаков. Летный эксперимент проводился в период с 18 ч 30 мин до 19 ч 55 мин. Погода района работ определялась тыловым сектором циклона, центр которого располагался над Кольским полуостровом. Самолетом была обследована гряда облаков Cu cong c верхней границей на высоте 3700 м и нижней границей на высоте 1500 м. Облака находились в стадии стационирования, значительных изменений в высоте верхней границы облаков отмечено не было, осадки отсутствовали. На высоте пролета облака были капельными. Проходы через облака были выполнены на высоте 3000 м. Скорость полета составляла около 220 км/ч. Периодически наблюдалось обледенение. В 19 ч 30 мин облака слились и начали рассеиваться, перешли в Ас. В 19 ч 55 мин были зафиксированы просветы.

На рис. 39 приведено распределение исследуемых характеристик при пересечении облака №4. Облако имело протяженность 4,6 км. Верхняя граница облака находилась на высоте 3500 м, нижняя – 2100 м. Облако не формировало

# радиоэха на экране бортового радиолокатора, что указывало на отсутствие в нем крупных частиц.



Рисунок 39 – Вертикальная компонента напряженности электрического поля (*E*), заряд самолета (*Q*), водность (*LWC*), скорость вертикального потока (*V*), температура перегрева (*T*) при проходе через облако №4 (18:57-19:00)

Вертикальная составляющая напряженности электрического поля в облаке была отрицательной, минимум находился в центре облака и составил минус 197 В/м. Имелись пространственные неоднородности, их протяженность находилась в пределах от 400 до 600 м. При этом минимальное значение напряженности электрического поля не совпадало с областью наиболее сильных восходящих движений.

Минимальное значение заряда летательного аппарата составило минус 7,12·10<sup>-6</sup> Кл. Минимум заряда находился во второй половине облака, там же где находились максимумы других величин. Максимальное значение водности облака составило 2,5 г/м<sup>3</sup>, максимальное значение скорости вертикального потока составило 12,8 м/с, максимальное значение перегрева составило 0,7°C. Имелись области, в которых некоторые характеристики одновременно достигали локальных максимумов, но при этом эти характеристики могли и не коррелировать между собой.

Обобщенные исследования напряженности электрического поля, заряда самолета и других характеристик (облака Cu cong небольшой вертикальной мощности)

Для проведения обобщенного анализа использовались данные 19 проходов самолета через 4 облака до их слияния и после. Всего было обработано 763 измерения.

Медианы, средние значения, минимумы, максимумы и среднеквадратические отклонения напряженности поля и заряда летательного аппарата для каждого из исследованных облаков и общие по всем облакам при доверительном интервале 95 % приведены в табл. 16, 17.

Минимальное значение вертикальной составляющей напряженности электрического поля в ходе всего эксперимента составило минус 319,4 В/м, а максимальное значение 41 В/м. Среднее значение вертикальной составляющей напряженности электрического поля равнялось минус 91,7 В/м и от облака к облаку изменялось в пределах от минус 124,4 В/м до минус 37,2 В/м.

82

Таблица 16 – Медиана, среднее значение, минимум, максимум, СКО вертикальной составляющей напряженности поля в каждом из облаков, общее и в среднем

Номер облака	Медиана Ме <i>Е</i> , В/м	Среднее значение <i>Ē</i> , В/м	Минимум <i>E</i> <sub>min</sub> , В/м	Максимум <i>E</i> <sub>max</sub> , В/м	СКО ( <i>бЕ</i> ), В/м
Облако № 2	-118,2	-124,4	-319,4	41,0	64,1
Облако № 3	-110,9	-121,3	-265,5	-1,9	83,8
Облако № 4	-132,4	-110,7	-197,8	19,8	59,3
Облако № 5	-37,9	-37,2	-86,2	18,3	25,5
Облака после слияния	-44,8	-40,8	-81,5	23,9	22,1
Среднее по всем облакам	-74,6	-91,7	-319,4	41,0	68,5

Таблица 17 – Медиана, среднее значение, минимум, максимум, СКО заряда летательного аппарата в каждом из облаков, общее и в среднем

Номер облака	Медиана Ме <i>Q</i> , Кл·10 <sup>-6</sup>	Среднее значение $ar{Q},$ Кл $\cdot 10^{-6}$	Минимум Q <sub>min</sub> , Кл·10 <sup>-6</sup>	Максимум <i>Q</i> <sub>max</sub> , Кл·10 <sup>-6</sup>	СКО ( <i>σQ</i> ), Кл·10 <sup>-6</sup>
Облако № 2	-5,1	-5,0	-9,9	-0,1	1,6
Облако № 3	-3,9	-4,7	-9,4	-0,8	2,5
Облако № 4	-5,1	-4,8	-7,1	-1,3	1,3
Облако № 5	-1,9	-2,3	-4,3	-0,3	1,2
Облака после слияния	-3,1	-3,0	-4,7	-0,5	0,9
Среднее по всем облакам	-3,9	-4,1	-9,9	-0,1	1,9

Наибольшее значение заряда летательного аппарата составило минус 9,9·10<sup>-6</sup> Кл, а наименьшее – минус 1,0·10<sup>-7</sup> Кл. Среднее значение заряда

летательного аппарата составило минус 4,1·10<sup>-6</sup> Кл и от облака к облаку изменялось в пределах от минус 5·10<sup>-6</sup> Кл до минус 2,3·10<sup>-6</sup> Кл.

На рис. 40, 41 представлены гистограммы распределения вертикальной составляющей напряженности поля и заряда летательного аппарата. B исследованных облаках 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 4.10<sup>-6</sup> Кл до минус 2.10<sup>-6</sup> Кл, а подавляющее большинство значений заряда пришлось на диапазон от минус  $6 \cdot 10^{-6}$  Кл до минус  $2 \cdot 10^{-6}$  Кл. Распределения значений не симметричные, не соответствуют нормальному. При ЭТОМ распределения значений являются унимодальными, без провалов и изолированных пиков, с ярко выраженным смещением максимума в сторону меньших по модулю значений, что может говорить как о специфическом распределении величин в данной облачной гряде, так и о недостаточной выборке.



Рисунок 40 – Гистограмма распределения вертикальной компоненты напряженности поля



Рисунок 41 – Гистограмма распределения заряда летательного аппарата

Также исследовались и другие параметры. Среднее значение водности составило 0,9 г/м<sup>3</sup> и изменялось от облака к облаку в диапазоне от 0,7 г/м<sup>3</sup> до 1,1 г/м<sup>3</sup>. Среднее значение скорости вертикальных потоков составило 5,4 м/с и изменялось в диапазоне от 3 м/с до 8,7 м/с. Среднее значение перегрева было равно 0,5°C и изменялось в диапазоне от 0,1°C до 0,7°C.

На рис. 42 представлено изменение относительных средних значений параметров облака № 2 во времени от прохода к проходу. Во время второго прохода значения водности, вертикальной составляющей напряженности поля и заряда самолета достигли максимальных значений. Скорость вертикальных потоков и перегрев со временем возрастали, в то время как напряженность поля уменьшилась по абсолютному значению.

На рис. 43 приводится изменение во времени гистограмм распределения напряженности поля, заряда и водности в облаке № 2. После 18 ч 37 мин, максимумы повторяемости всех трех величин сдвинулись в сторону меньших значений и далее оставались стабильными.

Диапазоны разброса значений также уменьшились и составили в среднем 200 В/м для напряженности поля, 4·10<sup>-6</sup> Кл для заряда, 1 г/м<sup>3</sup> для водности. При

этом, если в начале эксперимента значения параметров менялись, то во второй половине эксперимента они были относительно стабильны, напряженность поля была близка к 100 В/м, заряд – близок к минус 5 · 10<sup>-6</sup> Кл, водность – близка к 1 г/м<sup>3</sup>. Часть из рассмотренных распределений близка к нормальному со смещенным максимумом.



Рисунок 42 – Значения относительных средних значений величин напряженности вертикальной составляющей электрического поля (*E*), заряда самолета (*Q*), водности (*LWC*), скорости вертикального потока (*V*), температуры перегрева (*T*) в зависимости от номера прохода через облако



Рисунок 43 – Распределения вертикальной составляющей напряженности электрического поля, заряда самолета и водности в зависимости от времени измерения

Для определения статистической взаимосвязи между измеряемыми характеристиками был выполнен расчет коэффициентов корреляции Спирмена [109]. Обнаружена небольшая отрицательная корреляция напряженности поля с водностью, а также заряда самолета с водностью. На рис. 44, 45 изображены диаграммы рассеяния этих параметров. Обнаружена тенденция к увеличению по модулю напряженности поля и заряда самолета при повышении водности. Для напряженности поля и заряда коэффициенты корреляции составили минус 0,46 и минус 0,47 соответственно. Точки разбросаны относительно друг друга, но тенденция может быть аппроксимирована простой линейной функцией. Существенной корреляции вертикальной составляющей напряженности поля и заряда со скоростью восходящих потоков или перегревом облака обнаружено не было.



Рисунок 44 — Диаграмма рассеяния вертикальной составляющей напряженности электрического поля (*E*) и водности (*LWC*);  $E = -24,74 - 68,26 \cdot LWC$ 



Рисунок 45 – Диаграмма рассеяния заряда самолета (Q) и водности (LWC);  $Q = -2,3 \cdot 10^{-6} - 1,89 \cdot 10^{-6} \cdot LWC$ 

Величины вертикальной составляющей напряженности поля соответствуют общепринятым представлениям, согласно которым напряженность электрического поля в облаке может быть и положительной, и отрицательной.

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.

В длительной серии самолетных исследований начальной стадии электризации конвективных облаков несколькими российскими исследователями (Михайловский Ю.П., Синькевич А.А. и др.) была установлена явная решающая роль ледяной фазы в начальной стадии процесса организованной электризации, который имеет фундаментальное значение для понимания физики электризации облаков [33, 30, 47].

Имянитов И.М. показал, что двухдвигательный поршневой самолет в капельных облаках подобной мощности на данной широте с наибольшей повторяемостью (до 20 % всех случаев) приобретает отрицательный заряд более

чем минус 6,7·10<sup>-6</sup> Кл. При этом средние значения напряженности поля зависят от мощности облака и находятся в пределах 500 В/м, а сама напряженность электрического поля с изменением высоты изменяется и по величине, и по направлению [21].

По данным, представленным Пономаревым Ю.Ф. и Синькевичем А.А. [39], средние значения напряженности поля для развивающихся облаков составляли от 240 В/м до 260 В/м. Максимальные значения наблюдались в центральной части облаков.

Согласно данным, представленным Harris-Hobbs R. [83], в конвективных облаках на ранней стадии развития в зависимости от концентрации капель напряженность электрического поля может изменяться в диапазоне от 50 В/м до 10000 В/м.

Большое количество экспериментов по исследованию конвективных облаков провели американские исследователи по заказу NASA в штате Флорида при помощи самолета «Citation II» [74]. Согласно опубликованным ими данным средние значения напряженности электрического поля в кучевых облаках изменялись в пределах от 50 В/м до 50000 В/м. Наибольшая повторяемость значений напряженности поля находилась в диапазоне от 500 В/м до 2000 В/м. При увеличении концентрации облачных капель напряженность электрического поля увеличивалась [75].

Таким образом, 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.

Корреляция напряженности поля, заряда летательного аппарата с водностью облаков была обнаружена исследователями при полетах в конвективных облаках в Австралии и Французской Гвиане [70]. Данная корреляция также согласуется с представлениями об электризации самолетов в облаках, согласно которым величина заряда самолета существенным образом зависит от концентрации

облачных капель и водности облака [21].

#### Выводы

Для анализа результатов исследований, полученных 19 июля 1984 г при помощи самолета-лаборатории Ил-14 в конвективных облаках небольшой вертикальной мощности, и расчета напряженности электрического поля и заряда летательного аппарата использовались коэффициенты формы, которые были рассчитаны с использованием представленного автором метода компьютерного моделирования.

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 4,1·10<sup>-6</sup> Кл при минимуме минус 9,9·10<sup>-6</sup> Кл, что соответствует данным предыдущих исследований.

Была обнаружена небольшая тенденция к увеличению по абсолютным значениям напряженности электрического поля и заряда самолета с увеличением водности. Существенных корреляций скорости восходящих потоков в облаке или температурой перегрева облака с зарядом самолета или напряженностью электрического поля обнаружено не было.

## 4.2. Обобщение результатов измерений напряженности электрического поля и заряда 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 и приведенные в главе 2. Автор настоящей работы определил калибровочные коэффициенты самолета Ил-14, принимал участие в обработке исходных данных, выполнил представленный далее анализ.

## Описание эксперимента

Суммарный объем рассмотренных данных по полетам в конвективных облаках составляет 321 км полета в 26 облаках. Было обработано 3060 измерений, данные записывались с интервалом в 1 секунду. В табл. 18 представлены даты проведения летных экспериментов и формы исследованных облаков.

Дата	Форма облака	Самолет	Высота полета, км	Верхняя/ нижняя границы, км	Продолжи- тельность, м
08.04.1984	Cb	Ил-14	3,6	4,1/1,3	5400
08.04.1984	Cb	Ил-14	3,6	4,1/1,3	3900
10.07.1985	Cu cong	Ил-14	3,9	4,1/1	11700
10.07.1985	Cb	Ил-14	3,9	4,3/1	15600
10.07.1985	Cb	Ил-14	3,9	4,3/1	7200
11.08.1983	Сb	Ан-12	4,0	7,5/-	28000
11.08.1983	Cb	Ан-12	3,0	7,5/-	13100
12.04.1985	Cu cong	Ил-14	2,7	3,0/1,5	14000
12.04.1985	Cu cong	Ил-14	2,7	3,0/1,5	9700
13.08.1983	Cb	Ан-12	6,6	7,5/-	13500
13.08.1983	Cb	Ан-12	7,25	8,0/-	12000
13.08.1983	Cb	Ан-12	6,65	6,8/-	11600

Таблица 18 – Формы исследованных облаков

Дата	Форма облака	Самолет	Высота полета, км	Верхняя/ нижняя границы, км	Продолжи- тельность, м
13.08.1983	Cb	Ан-12	6,0	5,8/-	13100
13.08.1983	Cb	Ан-12	5,1	5,0/-	13100
14.07.1961	Cb	Ty-104	7,0	8,5/-	53100
18.07.1985	Cu cong	Ил-14	2,1	2,6/1,5	5300
22.06.1977	Cb	Ил-14	1,75	7,2/1,0	15500
22.07.1961	Cb	Ty-104	7,0	8,0/-	11400
24.06.1984	Cu cong	Ил-14	3,0	3,2/1,4	2700
24.06.1984	Cu cong	Ил-14	2,9	2,9/1,4	4800
24.06.1985	Cu med	Ил-14	2,0	2,3/-	19500
25.06.1984	Cu med	Ил-14	1,7	2,0/1,5	6700
25.06.1984	Cu med	Ил-14	1,7	2,0/1,5	9300
25.06.1984	Cu med	Ил-14	1,7	1,9/1,5	4900
25.06.1985	Cu cong	Ил-14	2,2	2,4/1,0	6300
25.06.1985	Cu cong	Ил-14	2,4	2,6/1,0	9700

В качестве примера обработанных данных на рис. 46-50 приведены графики компонент напряженности поля и заряда ЛА в облаке Cb, полученные в полете 8 апреля 1984 г.



Рисунок 46 – Продольная компонента напряженности электрического поля (*E<sub>X</sub>*)



Рисунок 47 – Вертикальная компонента напряженности электрического поля (Ег)



Рисунок 48 – Боковая компонента напряженности электрического поля (Е<sub>Y</sub>)



Рисунок 49 – Модуль вектора напряженности электрического поля (Е)



Рисунок 50 – Заряд самолета (Q)

Как видно из графиков, вход самолета в облако сопровождается резким увеличением напряженности поля и заряда ЛА.

Анализ величин напряженности поля и заряда ЛА в конвективных облаках

Для проведения анализа электрических характеристик конвективных облаков была проведена статистическая обработка данных по 26 облакам (см. табл. 18). 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 Кл·10<sup>-7</sup>. В табл. 19 приведены электрические характеристики для каждого облака.

Таблица 19 – Максимумы и средние значения модулей вектора напряженности поля и заряда ЛА для каждого из облаков

Форма облака	Дата	$ \overline{E} , \mathrm{B/M}$	$ E _{max}, \\ B/M$	$ \bar{Q} ,$ Кл $\cdot 10^{-7}$	<i>Q</i>   <sub>max</sub> , Кл∙10 <sup>-7</sup>
Cb	11.08.1983	16889	33279	67	201
Cb	11.08.1983	31118	63070	143	343
Cb	12.04.1985	34767	87758	1709	22785
Cu cong	12.04.1985	497	676	7	73
Cb	13.08.1983	10514	25400	33	122
Cb	13.08.1983	8560	14268	27	87
Cb	13.08.1983	2337	6026	12	36
Cb	13.08.1983	1647	2650	17	29
Cb	13.08.1983	2415	4238	24	38
Cb	14.07.1961	869	2264	311	1324
Cu cong	18.07.1985	446	829	55	223
Cb	22.06.1977	1015	2194	341	3308
Cb	22.07.1961	6232	10658	981	2203
Cu cong	24.06.1984	904	1939	356	687
Cu cong	24.06.1984	783	1817	269	718
Cb	24.06.1985	21292	60353	319	2484
Cu med	25.06.1984	220	578	166	388
Cu med	25.06.1984	525	751	181	267
Cu med	25.06.1984	644	827	219	279

Форма облака	Дата	$ \overline{E} , \mathrm{B/M}$	$ E _{max},$ B/M	$ \bar{Q} ,$ Кл $\cdot 10^{-7}$	<i>Q</i>   <sub>max</sub> , Кл·10 <sup>-7</sup>
Cb	08.04.1984	3948	10924	446	746
Cb	08.04.1984	28210	43653	559	2565
Cu cong	25.06.1985	637	1103	288	496
Cu cong	25.06.1985	938	3206	311	593
Cb	10.07.1985	7682	21805	268	747
Cb	10.07.1985	4582	15486	643	1737
Cb	10.07.1985	9086	24970	311	1680

Диаграммы размаха средних значений напряженности поля и ЛА самолета в конвективных облаках различных форм представлены на рис. 51, 52.



Рисунок 51 – Диаграмма размаха средних значений напряженности поля в конвективных облаках различных форм



Рисунок 52 – Диаграмма размаха средних значений заряда самолета в конвективных облаках различных форм

Гистограммы распределения средних значений напряженности поля и заряда ЛА в облаках Cb (всего 16 случаев) представлены на рис. 53, 54. 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 100·10<sup>-7</sup> Кл до 200·10<sup>-7</sup> Кл.

Гистограммы распределения средних значений напряженности электрического поля и заряда самолета в облаках Cu cong (всего 7 случаев) представлены на рис. 55, 56. 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 300·10<sup>-7</sup> Кл до минус 250·10<sup>-7</sup> Кл.



Рисунок 53 – Гистограмма распределения среднего значения модуля вектора напряженности поля (*E*) в облаках Cb (16 случаев)



Рисунок 54 – Гистограмма распределения среднего значения заряда самолета (Q) в облаках Cb (16 случаев)



Рисунок 55 – Гистограмма распределения среднего значения модуля вектора напряженности поля (*E*) в облаках Cu cong (7 случаев)



Рисунок 56 – Гистограмма распределения среднего значения заряда самолета (*Q*) в облаках Си сопд (7 случаев)

На рис. 57, 58 представлены гистограммы распределения средних значений напряженности поля и заряда ЛА в облаках Си med (всего 3 случая). В облаках Си med средние значения модуля вектора напряженности электрического поля принимали значения от 220 В/м до 644 В/м, заряда – от минус 166·10<sup>-7</sup> Кл до минус 219·10<sup>-7</sup> Кл.

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 напряженности электрического поля во время эксперимента составило 0,88, в облаках Cu cong – 0,37, в облаках Cu med – 0,22.



Рисунок 57 – Гистограмма распределения среднего значения модуля вектора напряженности поля (*E*) в облаках Cu med (3 случая)



Рисунок 58 – Гистограмма распределения среднего значения заряда самолета (Q) в облаках Си med (3 случая)

По данным Имянитова И.М. напряженность электрического поля в кучевых облаках может достигать величин 2000 В/м, среднее значение напряженности – 500 В/м. В грозовых может достигать 300000 В/м при среднем значении 40000 – 100000 В/м [21].

В соответствии с результатами исследований, полученными в кучевых облаках во Флориде, средние значения напряженности электрического поля составляли от 50 В/м до 50000 В/м. Наибольшая повторяемость значений заключалась в диапазоне от 500 В/м до 2000 В/м [74].

Синькевич А.А. приводит следующие данные по вертикальной компоненте напряженности поля в кучевых облаках: для облаков Сu med средние величины напряженности электрического поля принимают значения от 240 В/м до 345 В/м, максимальные – от 600 В/м до 1000 В/м в зависимости от стадии развития. Для облаков Cu cong и Cb средние величины напряженности электрического поля принимают значения от 1226 В/м до 19350 В/м, максимальные – от 6450 В/м до 75000 В/м в зависимости от стадии развития [45].

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

#### Радиолокационные исследования электрических характеристик облаков

Большой интерес вызывает возможность в будущем сопоставлять и взаимно использовать результаты самолетных измерений электрических характеристик облаков и результаты радиолокационных исследований при дистанционных измерениях интенсивности осадков и оценке вероятности возникновения опасных явлений. Измерения фазового состояния частиц внутри облака, электрических характеристик и неоднородностей позволят получить более глубокое понимание о связи между отражаемостью от облака и его другими характеристиками [49].

С целью исследования облаков, формирующих интенсивные осадки, был проведен анализ данных радиолокационных измерений за 18 июня 2020 г. Целью анализа являлось получение характеристик облаков, которые привели к столь обильным осадкам, оценки интенсивности осадков и частоты молний и поиск их взаимосвязи.

июня 2020 г в Санкт-Петербурге и окрестностях наблюдалось 18 прохождение кучево-дождевых облаков, отмечалось выпадение града, интенсивные осадки, шквал, гроза. Высота верхней границы облаков превосходила 12 км. Осадки состояли из смеси жидкокапельных и градовых частиц. Максимальная интенсивность осадков осадкомерным ПО измерениям, 139,2 10 была мм/ч. Общее осредненным за МИН, равна количество проанализированных облаков составило 19. Все исследованные облака были грозовыми.

Были использованы данные, полученные с помощью метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С. Расстояние от радиолокатора до исследуемых облаков не превосходило 51,5 км. Для измерения частоты электрических разрядов использовались данные системы Blitzortung.

Статистический анализ показал, что существует высокая корреляция между частотой возникновений молний, интенсивностью осадков и объема облака с крупой. Диапазон частот молний во время грозы составил от 0,1 до 7,0 мин<sup>-1</sup>.

Медианное значение в распределении было равно 1,9 мин<sup>-1</sup>. Коэффициент корреляции (Спирмена) между частотой разрядов и объемом облака с крупой был равен 0,53. Коэффициент корреляции между частотой разрядов и интенсивностью осадков по измерениям удельной дифференциальной фазы составил 0,75, между частотой разрядов и интенсивностью осадков по осадкомерным измерениям – 0,71.

#### Выводы

Выполнен анализ результатов измерений напряженности поля и заряда летательного аппарата, полученных в конвективных облаках в период с 1961 г по 1990 г при помощи самолетов-лабораторий Ан-12, Ту-104, Ил-14. Для вычисления значений напряженности поля и заряда ЛА были использованы коэффициенты формы, которые были рассчитаны при помощи методики компьютерного моделирования.

В облаках Сb 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.

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

В работе представлены результаты исследований высокослоистых и перистослоистых 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. Самолет Як-42Д «Росгидромет» оснащен большим количеством аппаратно-программных средств измерения: термодинамическим комплексом, комплексом измерения химического и аэрозольного состава атмосферы, актинометрическим комплексом, комплексом измерения радиоактивных загрязнений атмосферы, комплексом измерения микрофизических характеристик облаков, радиолокационным комплексом и комплексом измерений электрических характеристик атмосферы.

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 [34].

Измерения температуры выполнялись при помощи резервированных датчиков температуры из состава аппаратно-программного комплекса АПК-1 для измерения навигационных и термодинамических параметров атмосферы [8].

Для расчета напряженности поля и заряда летательного аппарата по данным датчиков напряженности поля были использованы калибровочные коэффициенты, рассчитанные при помощи метода компьютерного моделирования и приведенные в главе 2.

## Описание эксперимента

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

Режим №1 выполнялся в период с 10:20 до 10:54 и имел протяженность 400,2 км. Режим выполнялся с набором высоты от 3900 м до 5700 м и выполнялся в облаках As-Cs. Плотность облаков менялась от просвечивающих до плотных. Визуально отмечались кристаллы. В ходе набора высоты температура менялась от минус 10,8°C до минус 20,7°C при минимуме минус 22,2°C. Графики компонент напряженности поля, высоты, температуры и заряда летательного аппарата приведены на рис. 59-65.

Режим №2 выполнялся в период с 12:12 по 12:18 на высоте 3600 м и имел протяженность 73,6 км. Режим характеризовался проходами через слои облаков As при температуре от 2°C до 5°C. Графики компонент напряженности электрического поля, высоты, температуры и заряда летательного аппарата приведены на рис. 66-72.



Рисунок 59 – Режим №1. Продольная компонента напряженности электрического поля (*E*<sub>X</sub>)



Рисунок 60 – Режим №1. Вертикальная компонента напряженности

электрического поля (*E*<sub>Z</sub>)



Рисунок 61 — Режим №1. Боковая компонента напряженности электрического поля  $(E_Y)$ 



Рисунок 62 – Режим №1. Модуль вектора напряженности электрического поля (Е)






Рисунок 64 – Режим №1. Высота полета (Н)



Рисунок 65 – Режим №1. Температура воздуха (Т)



Рисунок 66 – Режим №2. Продольная компонента напряженности электрического поля ( $E_X$ )



Рисунок 67 – Режим №2. Вертикальная компонента напряженности электрического поля (*E*<sub>Z</sub>)



Рисунок 68 – Режим №2. Боковая компонента напряженности электрического



Рисунок 69 – Режим №2. Модуль вектора напряженности электрического поля (Е)



Рисунок 70 – Режим №2. Заряд самолета (Q)







Рисунок 72 – Режим №2. Температура воздуха (Т)

Исследование напряженности поля, заряда летательного аппарата и других характеристик в высокослоистых и перисто-слоистых облаках

Для проведения анализа был проведен расчет описательных статистик полученных данных. Были вычислены средние значения, медианы и среднеквадратические отклонения измеряемых величин при доверительном интервале 95 %.

Средние значения, медианы, максимумы, минимумы и среднеквадратические отклонения напряженности электрического поля и заряда самолета для каждого из исследованных типов облаков приведены в табл. 20-24.

Таблица 20 – Описательные статистики продольной компоненты напряженности электрического поля *E*<sub>X</sub>

Тип облаков	Среднее значение <i>Ē</i> , В/м	Медиана Ме <i>Е</i> , В/м	Максимум <i>E</i> <sub>max</sub> , В/м	Минимум <i>E</i> <sub>min</sub> , В/м	СКО ( <i>σЕ</i> ), В/м
As-Cs (Режим №1)	0,5	1,6	21,8	-21,5	8,4
As (Режим №2)	3,8	3,3	12,3	-4,6	3

Таблица 21 – Описательные статистики вертикальной компоненты напряженности электрического поля *E*<sub>Z</sub>

Тип облаков	Среднее значение <i>Ē</i> , В/м	Медиана Ме <i>Е</i> , В/м	Максимум <i>E</i> <sub>max</sub> , В/м	Минимум <i>E</i> <sub>min</sub> , В/м	СКО ( <i>бЕ</i> ), В/м
As-Cs (Режим №1)	19,3	21,3	91,2	-55,3	15,1
As (Режим №2)	-17,7	-25,8	37,2	-42,5	20,9

Таблица 22 – Описательные статистики боковой компоненты напряженности электрического поля *E*<sub>Y</sub>

Тип облаков	Среднее значение <i>Ē</i> , В/м	Медиана Ме <i>Е</i> , В/м	Максимум <i>E</i> <sub>max</sub> , В/м	Минимум <i>E</i> <sub>min</sub> , В/м	СКО ( <i>бЕ</i> ), В/м
As-Cs (Режим №1)	7,6	8,2	20	-61,3	7,6
As (Режим №2)	14,2	10,5	43,1	3,7	10,1

Таблица 23 – Описательные статистики модуля вектора напряженности электрического поля *E* 

Тип облаков	Среднее значение <i>Ē</i> , В/м	Медиана Ме <i>Е</i> , В/м	Максимум <i>E</i> <sub>max</sub> , В/м	Минимум E <sub>min</sub> , В/м	СКО ( <i>бЕ</i> ), В/м
As-Cs (Режим №1)	25,8	25,1	106,5	16,8	10,9
As (Режим №2)	32	29,9	53,4	16,3	7,3

Таблица 24 – Описательные статистики заряда самолета Q

Тип облаков	Среднее значение $ar{Q}$ , Кл $\cdot 10^{-7}$	Медиана Ме <i>Q</i> , Кл·10 <sup>-7</sup>	Максимум <i>Q</i> <sub>max</sub> , Кл · 10 <sup>-7</sup>	Минимум Q <sub>min</sub> , Кл·10 <sup>-7</sup>	СКО ( <i>σQ</i> ), Кл·10 <sup>-7</sup>
As-Cs (Режим №1)	-13,6	-16	8,8	-26,7	6,46
As (Режим №2)	1,2	1,4	7,7	-6,8	2,8

На рис. 73, 74 изображены диаграммы размаха средних значений напряженности поля и заряда летательного аппарата.



Рисунок 73 – Диаграмма размаха средних значений напряженности электрического поля в высокослоистых и перисто-слоистых облаках



Рисунок 74 – Диаграмма размаха средних значений заряда самолета в высокослоистых и перисто-слоистых облаках

Максимальное значение вертикальной компоненты напряженности поля в ходе эксперимента составило 91,2 В/м, а минимальное значение – минус 55,3 В/м. Среднее значение составило 13,6 В/м. Максимальное значение продольной компоненты напряженности поля в ходе всего эксперимента составило 21,8 В/м, а минимальное значение – минус 21,5 В/м. Среднее значение составило 1 В/м. Максимальное значение боковой компоненты напряженности поля в ходе всего эксперимента составило 1 В/м. Максимальное значение 43,1 В/м, а минимальное значение – минус 61,3 В/м. Среднее значение – минус 61,3 В/м. Среднее значение оставило 43,1 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 8,8·10<sup>-7</sup> Кл, а наименьший – минус 26,7·10<sup>-7</sup> Кл. Среднее значение заряда было равно минус 11,3·10<sup>-7</sup> Кл.

Значимая корреляция между исследованными всеми величинами отсутствовала. Для облаков As (Режим №2) была обнаружена очень слабая корреляция напряженности и заряда с температурой окружающего воздуха. Графики изменения данных параметров от пройденного расстояния представлены на рис. 75, 76. Диаграммы рассеяния этих параметров изображены на рис. 77, 78. Коэффициенты корреляции составили минус 0.28 соответственно для напряженности поля и 0,41 для заряда самолета.

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

Имянитов И.М., Чубарина Е.В. приводят следующие данные по облакам слоистообразных форм: среднее значение напряженности поля в облаках As составляет минус 200 В/м при минимуме минус 1450 В/м и максимуме 650 В/м, среднее значение напряженности поля в облаках Cs составляет 0 В/м при минимуме минус 900 В/м и максимуме 2000 В/м [23]. Полученные вновь значения находятся в соответствии с опубликованными ранее данными. Стоит отметить, что данные измерений всех трех компонент напряженности электрического поля являются крайне редкими, поэтому полученные результаты можно считать оригинальными.



Рисунок 75 – Напряженность электрического поля (синий) и температура воздуха (красный) в облаках As (Режим №2)



Рисунок 76 – Заряд ЛА (синий) и температура воздуха (красный) в облаках As (Режим №2)



Рисунок 77 – Диаграмма рассеяния напряженности электрического поля и температуры воздуха в облаках As (Режим №2)



Рисунок 78 – Диаграмма рассеяния заряда самолета и температуры воздуха в облаках As (Режим №2)

# Выводы

Выполнен анализ результатов измерения напряженности поля и заряда летательного аппарата, полученных при полетах летающей лаборатории Як-42Д «Росгидромет» в облаках As и Cs.

Для расчета напряженности и заряда использовались коэффициенты формы летательного аппарата, определенные при помощи метода компьютерного моделирования.

Величина напряженности поля в облаках As-Cs (Режим №1) в среднем составила 25,8 В/м при максимуме 106,5 В/м. Величина напряженности поля в облаках As (Режим №2) в среднем составила 32 В/м при максимуме 53,4 В/м. Полученные данные соответствуют ранее опубликованным.

В облаках As-Cs (Режим №1) среднее значение заряда самолета составило минус 13,6·10<sup>-7</sup> Кл при минимуме минус 26,7·10<sup>-7</sup> Кл. В облаках As (Режим №2) среднее значение заряда самолета составило 1,2·10<sup>-7</sup> Кл при максимуме 7,7·10<sup>-7</sup> Кл.

Была обнаружена слабая корреляция напряженности электрического поля и заряда самолета с температурой окружающего воздуха в облаках As.

### Выводы к главе 4

1. Выполнен расчет напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных, высокослоистых и перисто-слоистых облаках, полученных в ходе летных работ с использованием самолетов-лабораторий Ил-14 и Як-42Д, на основе калибровочных коэффициентов, полученных в результате компьютерного моделирования. Выполнены обобщение и анализ результатов исследований напряженности поля и заряда летательного аппарата, полученных в результате при помощи самолетов Ил-14, Ту-104, Ан-12, Як-42Д.

2. Результаты данной работы были использованы в ходе выполнения НИР «Предоставление информационно-аналитических данных по структурам электрических полей облаков», выполненной в ГГО им. А.И. Воейкова в 2018 г.

3. В результате анализа данных измерений напряженности поля и заряда

летательного аппарата в конвективных облаках небольшой вертикальной мощности, полученных 19 июля 1984 г при помощи самолета-лаборатории Ил-14, величина напряженности электрического поля в среднем составила минус 92 В/м при минимуме минус 320 В/м. Среднее значение заряда самолета Ил-14 составило минус 4,1·10<sup>-6</sup> Кл при минимуме в минус 9,9·10<sup>-6</sup> Кл.

4. В результате анализа данных измерений напряженности поля и заряда летательного аппарата, полученных в период с 1961 г по 1990 г при помощи самолетов Ил-14, Ту-104, Ан-12, было установлено, что в облаках Cb среднее значение напряженности 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 поля во время эксперимента составило 0,88, в облаках Cu cong – 0,37, в облаках Cu med – 0,22.

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

5. В результате анализа данных полета самолета-метеолаборатории Як-42Д «Росгидромет» 19 июня 2014 г было установлено, что напряженность 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.

В облаках As-Cs среднее значение заряда самолета составило минус 13,6·10<sup>-7</sup> Кл при минимуме минус 26,7·10<sup>-7</sup> Кл. В облаках As среднее значение заряда летательного аппарата составило 1,2·10<sup>-7</sup> Кл при максимуме 7,7·10<sup>-7</sup> Кл.

В облаках As обнаружена слабая корреляция напряженности поля и заряда летательного аппарата с температурой окружающего воздуха. Масштаб неоднородности электрического поля для облаков As-Cs составил 12 км, для облаков As – 4,4 км.

121

#### Заключение

В ходе выполнения данной работы впервые была разработана методика компьютерного математического моделирования самолетов-лабораторий, позволяющая определить положения электрических нейтралей на поверхности самолета, выработать рекомендации по расположению датчиков напряженности 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, специализированных самолетов-лабораторий. является использование Для обеспечения измерений на борту самолета электрических полей атмосферы и собственного заряда летательного аппарата необходимо использовать системы измерителей, состоящие из нескольких электростатических флюксметров. Наиболее перспективным методом калибровки измерительной системы является компьютерное моделирование – менее затратный и трудоемкий метод, имеющий определения калибровочных существенное преимущество В точности коэффициентов перед масштабным моделированием.

В работе выполнен анализ методов измерения напряженности поля атмосферы и заряда летательного аппарата, приведена физико-математическая модель расчета заряда летательного аппарата и электрических полей, создаваемых летательным аппаратом, разработана методика измерений напряженности поля и заряда самолета с использованием компьютерного моделирования, выполнена оценка точностных характеристик измерений напряженности поля. Показано, что калибровки измерителей при существующих методах систематические погрешности определения коэффициентов искажения поля формой самолета и его могут зарядом 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 самолеталаборатории 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 анализ результатов исследования напряженности поля и заряда летательного аппарата, полученных при использовании самолета-лаборатории Ил-14 в конвективных облаках небольшой вертикальной мощности, анализ результатов исследований слоистообразных облаков с помощью атмосферноэлектрического комплекса действующего самолета-метеолаборатории Як-42Д «Росгидромет», анализ результатов измерений напряженности поля и заряда летательного аппарата, полученных при помощи самолетов-лабораторий Ил-14, Ту-104, Ан-12 с 1961 г по 1990 г в конвективных облаках, выполнено исследование неоднородностей электрических структур конвективных облаков.

Выполнен анализ данных о конвективных облаках небольшой вертикальной мощности, полученных при помощи самолета-лаборатории Ил-14 19 июля 1984 г. Средняя величина напряженности электрического поля составила минус 92 В/м при минимуме минус 320 В/м. Значение заряда самолета в среднем составило минус 4,1·10<sup>-6</sup> Кл при минимуме минус 9,9·10<sup>-6</sup> Кл.

Обнаружена тенденция к увеличению по модулю величин напряженности

123

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 самолетовлабораторий Ил-14, Ту-104, Ан-12 в период с 1961 г по 1990 г. Среднее значение напряженности поля в облаках Cb 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 поля во время эксперимента составило 0,88, в облаках Cu cong – 0,37, в облаках Cu med – 0,22.

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

В облаках As-Cs среднее значение заряда самолета составило минус  $13,6\cdot10^{-7}$  Кл при минимуме минус  $26,7\cdot10^{-7}$  Кл. В облаках As среднее значение заряда самолета составило  $1,2\cdot10^{-7}$  Кл при максимуме  $7,7\cdot10^{-7}$  Кл.

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

Масштаб неоднородности электрического поля для облаков As-Cs составил 12 км, для облаков As – 4,4 км.

124

# Список сокращения и условных обозначений

БпЛА	_	Беспилотный летательный аппарат
ЛА	_	Летательный аппарат
НИР	_	Научно-исследовательская работа
ПНП	_	Прибор напряженности поля
Ac	_	Altocumulus
As	_	Altostratus
CAE	_	Computer-aided engineering
Cb	_	Cumulonimbus
Cs		Cirrostratus
Cu cong	_	Cumulus congestus
Cu med	_	Cumulus mediocris
MALE	_	Medium-altitude long-endurance
NASA	_	National Aeronautics and Space Administration

## Список используемых источников

- Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Синькевич А.А., Торопова М.Л. Развитие электризации конвективного облака по данным эмпирической и численной моделей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – № S674. – С. 68-74.
- Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Анаев М.А., Соловьев В.В., Шагин С.И. Многоцелевой авиационный комплекс мониторинга, предупреждения и защиты от стихийных бедствий на базе беспилотного летательного аппарата "Нарт" // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 3 (116). С. 229-238.
- Абшаев М.Т., Анаев М.А., Соловьев В.В. Беспилотный авиационный комплекс для мониторинга и предотвращения опасных явлений погоды // Экология и промышленность России. 2008. № 10. С. 4-8.
- Азаров А.С., Борисов Ю.А., Данелян Б.Г., Петров В.В., Струнин М.А., Фомин Б.А., Хаттатов В.У., Варкуловский С.М., Синькевич А.А. Новые возможности в проведении исследований атмосферных процессов и мониторинга окружающей среды с использованием самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. – Нальчик, 2015. – С. 48-58.
- 5. Акселевич В.И., Торгунаков Р.Е. Летательные аппараты и статическое электричество // МЕТЕОСПЕКТР. 2013. № 2 С. 105-111.
- Алберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. М.: Наука, 1977.
- Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Гурьев А.В. Аппаратная платформа аэростатных аэроэлектрических наблюдений // Научное приборостроение. Работы с конференции. – 2017. – Том 27, № 1. – С. 24-28.
- 8. Базанин Н.В., Борисов Ю.А., Волков В.В., Дмитриев В.К., Живоглотов Д.Н.,

Макоско А.А., Струнин А.М., Струнин М.А. Бортовые комплексы самолеталаборатории нового поколения Як-42Д «Росгидромет» для измерения и регистрации навигационных параметров полета и термодинамических параметров атмосферы // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 11. – С. 83-102.

- Белов Б.А., Евтеев Б.Ф., Михайловский Ю.П. О точности измерений напряженности электрического поля атмосферы и заряда самолета с помощью самолетов-лабораторий // Вопросы атмосферного электричества. Сб. статей. – 1990. – С. 138-146.
- Болдырев А.И., Вязилов А.Е., Иванов В.Н., Кемаев Р.В., Коровин В.Я., Меляшинский А.В., Памухин К.В., Памухина И.А., Панов В.Н., Швырев Ю.Н. Высокочувствительный флюксметр для регистрации вариаций напряженности электрического поля атмосферы земли // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 5. – С. 123-132.
- 11. Вязилов А.Е., Иванов В.Н., Козлов С.В., Свиркунов П.Н., Швырев Ю.Н. Мониторинг электрического поля атмосферы и анализ его вариаций в условиях осадков // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. – Нальчик: ВГИ, 2021. – С. 126-132.
- 12. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
- Горбатенко В.П. Влияние географических факторов климата на грозовую активность // Вопросы географии Сибири. – Томск., 2001. – С. 66-78.
- Горбатенко В.П. Синоптические условия образования и развития гроз над территориями Западной Сибири и Казахстана // Вестник Томского государственного университета. – 2001. – № 274. – С. 148-154.
- Драчева В.П., Синькевич А.А., Чубарина Е.В. Исследование неоднородностей конвективных облаков // Труды ГГО. – 1988. – Вып. 518. – С. 145-153.
- 16. Жекамухов М.К., Каров Б.Г., Кумыков Т.С. Электризация и пространственное разделение зарядов при выделении пузырьков воздуха в процессе коагуляционного роста градин в облаке. Часть II. Генерирование грозового

электричества за счет выделения заряженных пузырьков при намерзании переохлажденных облачных капель на поверхности градин // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 12. – С. 15-24.

- Звонарев В.В., Лядов В.С., Синькевич А.А., Пономарев Ю.Ф., Степаненко В.Д. Особенности самолета-лаборатории ГГО Ил-14 // Труды ГГО. – 1986. – Вып. 497. – С. 51-62.
- Имянитов И.М. Измерение электростатических полей в верхних слоях земной атмосфер // Успехи физических наук. – 1957. – Т. 63. – Вып. 1 – С. 267-282.
- Имянитов И.М. К вопросу о механизме электростатического заряжения // Доклады Академии наук СССР. – 1958. – Т. 109. – № 1 – С. 93-96.
- Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М.: Гостехиздат, 1957.
- 21. Имянитов И.М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л.: Гидрометеоиздат, 1970.
- Имянитов И.М., Пономарев Ю.Ф., Чубарина Е.В. Сравнительные атмосферно-электрические измерения в свободной атмосфере над Арктикой // Труды ГГО. 1980. Вып. 401. С. 83-90.
- 23. Имянитов И.М., Чубарина Е.В. Электричество свободной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1965.
- 24. Кашлева Л.В. Атмосферное электричество. СПб.: РГГМУ, 2008.
- 25. Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П. Атмосферное электричество. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2019.
- 26. Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П., Михайловский В.Ю. Механизмы электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2016. – № 45. – С. 119-131.
- 27. Кононов И.И., Крутой Д.М., Юсупов И.Е. Альтернативное обеспечение грозобезопасности на объектах водного транспорта // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2013. – Выпуск 3. – С. 116-121.

- Кононов И.И., Юсупов И.Е. Современные методы пассивной локации гроз // Естественные и антропогенные аэрозоли. Материалы 3-й международной конференции. – СПб., 2001. – С. 352-356.
- 29. Коровин Е.А., Ефимов В.А., Щукин Г.Г., Денисенков Д.А., Чернышев С.В. Компенсация контактной разности потенциалов в электростатических флюксметрах // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской научной конференции. – Муром, 2017. – С. 416-422.
- 30. Коровин Е.А., Юсупов И.Е., Готюр И.А., Самойлова И.С., Щукин Г.Г. Усовершенствованный прибор напряженности электрического поля // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской научной конференции. – Муром, 2022. – С. 571-576.
- Михайловский Ю.П. О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации // Труды ГГО. 2016. Вып. 580. С. 125-138.
- Михайловский Ю.П. О технологии контроля напряженности электрического поля атмосферы и облаков с помощью самолетов-лабораторий // Методы и устройства передачи и обработки информации. – Муром, 2014. – № 16. – С. 41-45.
- 33. Михайловский Ю.П., Кашлева Л.В. Методика и результаты исследований облаков электризации конвективных с помощью самолетов // СПб.: Радиолокационная метеорология активные воздействия И \_ Гидрометеоиздат, 2012. - С. 98-114.
- 34. Михайловский Ю.П., Зайнетдинов Б.Г., Попов В.Б., Синькевич А.А. Самолетлаборатория Як-42 «Росгидромет» как средство контроля электрических характеристик атмосферы и облаков // Доклады Всероссийской отрытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. – Нальчик, 2015. – С. 327-333.
- 35. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Зайнетдинов Б.Г., Попов В.Б.

129

Особенности контроля грозовой активности различными радиофизическими средствами (радиолокатор, грозопеленгационные системы, наземные флюксметры) // Труды конференции РРВ-26. – Казань, 2019. – Том II. – С. 566-570.

- 36. Мучник В.М. Физика грозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
- Мучник В.М., Фишман В.Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
- Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. Учебник. М.: Из-во Моск. ун-та: Наука, 2006.
- 39. Пономарев Ю.Ф., Синькевич А.А. Электризация конвективных облаков на северо-западе России // Метеорология и гидрология. 1997. № 6. С. 73-80.
- Причины статической электризации самолетов и меры уменьшения ее опасности. Методическое письмо // Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984.
- Пустовалов К.Н., Горбатенко В.П., Громова А.В., Нагорский П.М., Оглезнева М.В. Грозовая активность на юге Западной Сибири по данным WWLLN за 2016-2020 годы // Распространение радиоволн. Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции. – Калининград, 2021. – С. 746-751.
- 42. Роджерс Р.Р. Краткий курс физики облаков // Пер. с англ. Сергеева Б.Н. под ред. Мазина И.П. Л.: Гидрометеоиздат, 1979.
- 43. Синькевич А.А. Исследование термических характеристик мощных кучевых облаков с помощью ИК-радиометра // Метеорология и гидрология. 1984. № 1. С. 40-46.
- 44. Синькевич А.А. Создание комплекса самолетной метеорологической аппаратуры, разработка методики ее применения и результаты экспериментальных исследований облаков. Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук // Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. – СПб, 1992.
- 45. Синькевич А.А. Конвективные облака Северо-Запада России. СПб.:

Гидрометеоиздат, 2001.

- Синькевич А.А. Некоторые результаты исследований пульсаций температуры в слоистообразных облаках // Труды ГГО. – 1994. – Вып. 482. – С. 97-107.
- 47. Синькевич А.А., Веремей Н.Е., Волков Н.Н., Довгалюк Ю.А., Пономарев Ю.Ф., Степаненко В.Д. Экспериментальные исследования пространственно-временной неоднородности строения конвективных облаков // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 38-50.
- Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Богданов Е.В., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов // Метеорология и гидрология. 2016. № 9. С. 27-40.
- 49. 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.
- 50. Тверской П.Н. Курс метеорологии (Физика атмосферы) Л.: Гидрометеоиздат, 1962.
- 51. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
- 52. Торгунаков Р.Е. О возможности применения беспилотных летательных аппаратов для исследований напряженности электрических полей в атмосфере // Труды ГГО. – 2018. – Вып. 588. – С. 37-46.
- 53. 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.
- 54. 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.

- 55. 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.
- 56. 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 открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Часть 1. – Нальчик: ВГИ, 2017. – С. 205-212.
- 57. 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.
- 58. 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.
- 59. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
- Чубарина Е.В. К методике обработки данных высотных измерений напряженности электрического поля атмосферы // Труды ГГО. 1977. Вып. 350. С. 87-90.
- 61. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозовое электричество. Л.: Гидрометеоиздат, 1964.
- 62. Шметер С.М. Физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1972.
- 63. Abid R. Electrical characterisation of aerospace grade carbon-fibre-reinforced

polymers. PhD Thesis. - Cardiff School of Engineering, 2015. - P. 19-24.

- Bailey J.C., Anderson R.V. Experimental calibration of a vector electric field meter measurement system on an aircraft. – Washington, DC: Naval Research Laboratory, 1987.
- 65. Bateman M.G., Stewart M.F., Podgorny S.J., Christian H.J., Mach D.M., Blakeslee R.J., Bailey J.C., Daskar D. A low-noise, microprocessor-controlled, internally digitizing rotating-vane electric field mill for airborne platforms // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – American Meteorological Society, 2007. – Vol. 24. – P. 1289-1302.
- 66. Bennet A.J., Harrison R.G. In situ calibration of atmospheric air conductivity instruments // Review of Scientific Instruments. AIP Publishing, 2006. Vol. 77. 016103.
- 67. Betz H.D., Schumann U., Laroche P. Lightning: principles, instruments and applications: review of modern lightning research. Springer Dordrecht, 2009.
- Blakeslee R.J., Christian H.J., Vonnegut B. Electrical measurements over thunderstorms // Journal of Geophysical Research. – American Geophysical Union, 1989. – Vol. 94. – P. 13135-13140.
- Bouchard A., Lalande Ph., Laroche P., Blanchet P., Buguet M., Chazottes A. Relationship between airborne electrical and total water content measurements in ice clouds // Atmospheric Research. – 2020. – Vol. 237. – 104836.
- 70. Bouchard A., Laroche P., Lalande Ph., Blanchet P., Buguet M., Chazottes A. Comparison between the electrostatic equilibrium on aircraft flying convective cloud and the local total water content // XVI International Conference on Atmospheric Electricity. – Nara, Japan, 2018.
- 71. Buguet M., Lalande Ph., Laroche P., Blanchet P., Bouchard A., Chazottes A. Thundercloud electrostatic field measurements during the inflight EXAEDRE campaign and during lightning strike to the aircraft // Atmosphere. 2021. Vol. 12.
- Chubb J.N. Two new designs of 'field mill' type fieldmeters not requiring earthing of rotating chopper // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1990. – Vol.

26. – P. 1178-1181.

- 73. Chum J., Langer R., Base J., Kollarik M., Strharsky I., Diendorfer G., Rusz J. Significant enhancements of secondary cosmic rays and electric field at the high mountain peak of Lomnický Štít in High Tatras during thunderstorms // Earth, Planets and Space. 2020. Vol. 72. 28.
- 74. Dye J.E., Lewis S. Final report to NASA KSC on the airborne field mill project (ABFM). Colorado: National Center for Atmospheric Research, 2001.
- 75. Dye J.E. Electric fields, cloud microphysics, and reflectivity in anvils of Florida thunderstorms / Dye J.E., Bateman M.G., Christian H.J., Defer E., Grainger C.A., Hall W.D., Krider E.P., Lewis S.A., Mach D.M., Merceret F.J., Willett J.C., Willis P.T. // Journal of Geophysical Research. American Geophysical Union, 2007. Vol. 112. D11215.
- 76. Easterbrook C.C., Rudolph T.H., Easterbrook K. Estimating electric field enhancement factors in aircraft utilizing a small-scale model: A method evaluation // International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity. – Oklahoma City, 1988. – P. 171-174.
- Foken Th. Springer Handbook of Atmospheric Measurements. Springer Nature, 2021.
- Gott J.P On the electric charge collected by water drops falling through ionized air in a vertical electric field // Proceedings of the Royal Society. – London, 1933. – Vol. 142. – P. 248-268.
- 79. Harrison R.G. Behind the curve: A comparison of historical sources for the Carnegie curve of the global atmospheric circuit // History of Geo- and Space Sciences. 2020 Vol. 11. P. 207-213.
- Harrison R.G. Meteorological Measurements and Instrumentation. John Wiley and Sons, Chichester, 2015.
- Harrison R.G., Marlton G.J., Nicoll K.A., Airey M.W., Williams P.D. A selfcalibrating wide range electrometer for in-cloud measurements // Review of Scientific Instruments. – 2017. – Vol. 88. – 126109.
- 82. Harrison R.G., Nicoll K.A. Fair weather criteria for atmospheric electricity

measurements // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – Vol. 179. – P. 239-250.

- Harris-Hobbs R. Application of airborne field mill data for use in launch support // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – American Meteorological Society, 1993. – Vol. 11. – P. 738-750.
- Jayaratne E.R., Saunders C.P.R., Hallett J. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1983. – Vol. 109. – P. 609-630.
- Jones J.J. Electric charge acquired by airplanes penetrating thunderstorms // Journal of Geophysical Research. – American Geophysical Union, 1990. – Vol. 95. – P. 16589-16600
- Koshak W.J. Retrieving storm electric fields from aircraft field mill data. Part I: theory // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – American Meteorological Society, 2006. – Vol. 23. – P. 1303-1322.
- 87. Koshak W.J., Mach D.M., Christian H.J., Stewart M.F., Bateman M.G. Retrieving storm electric fields from aircraft field mill data. Part II: applications // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. American Meteorological Society, 2006. Vol. 23. P. 1303-1322.
- Laroche P. Airborne measurements of electrical atmospheric field produced by convective clouds // Revue de Physique Appliquée. – Paris, 1986. – Vol. 21. – P. 809-815.
- Levin Z., Hobbs P.V. Splashing of water drops on solid and wetted surfaces: hydrodynamics and charge separation // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1971. – Vol. 269. – P. 555-585.
- MacGorman D.R., Rust W.D. The electrical nature of thunderstorms. Oxford University Press, 1998.
- 91. Mach D.M. Technique for reducing the effects of nonlinear terms on electric field measurements of electric field sensor arrays on aircraft platforms. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. American Meteorological Society, 2015. Vol. 32. P. 993-1003.

- 92. Mach D.M., Koshak W.J. General matrix inversion technique for the calibration of electric field sensor arrays on aircraft platforms // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – American Meteorological Society, 2007. – Vol. 24. – P. 1576-1587.
- 93. Mach D.M., Blakeslee R.J., Bateman M.G., Bailey J.C. Electric fields, conductivity, and estimated currents from aircraft overflights of electrified clouds // Journal of Geophysical Research. – American Geophysical Union, 2009. – Vol. 114. – D10204.
- 94. Marshall B.J.P., Latham J., Saunders C.P.R. A laboratory study of charge transfer accompanying the collision of ice crystals with a simulated hailstone // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1978. – Vol. 104. – P. 163–178.
- 95. Mason B.J. A critical examination of theories of charge generation in thunderstorms.
  Tellus, 1953. Vol. 5. P. 446-460.
- 96. Maxwell Help // ANSYS Electromagnetics Suite 2021 R1. ANSYS Inc, 2021. –
  P. 3011-3148.
- Mazur V., Ruhnke L.H., Rudolph T. Effect of E-field mill location on accuracy of electric field measurements with instrumented airplane // Journal of Geophysical Research. – American Geophysical Union, 1999. – Vol. 92. – P. 12013-12019.
- 98. Michinowski S, Odzimek A., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Klos Z., Israelsson S., Nikiforova N.N. Review of relationships between solar wind and ground-level atmospheric electricity: Case studies from Hornsund, Spitsbergen, and Swider, Poland // Survey in Geophysics. – 2021. – Vol. 42. – P. 757-801.
- 99. Mo Q., Feind R.E., Kopp F.J., Detwiler A.G. Improved electric field measurements with the T-28 armored research airplane // Journal of Geophysical Research. – American Geophysical Union, 1999. – Vol. 104. – P. 24485-24497.
- 100. Nicoll K.A. Measurements of atmospheric electricity aloft // Surveys in Geophysics.
   2012. Vol. 33. P. 991-1057.
- 101. Pavan C., Fontanes M., Urbani M., Nguyen N.C., Martinez-Sanchez M., Peraire J., Montanya J., Guerra-Garcia C. Aircraft charging and its influence on triggered lightning // Journal of Geophysical Research. – American Geophysical Union, 2020. – Vol. 125.

- 102. Reynolds S.E., Neill H.W. The distribution and discharge of thunderstorm chargecenters // Journal of the Atmospheric Sciences. – American Meteorological Society, 1955. – Vol. 12. – P. 1-12.
- 103. Ribaud J.F., Bousquet O., Coquillat S. Relationships between total lightning activity, microphysics and kinematics during the 24 September 2012 HyMeX bowecho system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2016. – Vol. 142. – P. 298–309.
- 104. Rudolph T.H., Perala R.H. Interpretation methodology and analysis of in-flight lightning data. NASA Contract Rep. NASA-CR-3590. – NASA, 1982.
- 105. Saunders C.P.R. Charge separation mechanisms in clouds // Space Science Reviews.
   2008. Vol. 137. P. 335-353.
- 106. Shewchuk S.P., Iribarne J.V. Charge separation during splashing of large drops on ice // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1971. – Vol. 97. – P. 272-282.
- 107. Shewchuk S.P., Iribarne J.V. Electrification associated with droplet accretion on ice
   // Journal of the Atmospheric Sciences. 1974. Vol. 31. P. 777–786.
- 108. Simpson G.C., Scrase F.J. The distribution of electricity in thunderclouds // Proceedings of the Royal Society. London, 1937. Vol. 161. P. 309-352.
- 109. STATISTICA. Официальное руководство. StatSoft, 1995. Том I: Основные соглашения и статистики. Р. 1624-1625.
- 110. Stolzenburg M., Rust W.D., Marshall T.C. Electrical structure in thunderstorm convective regions // Journal of Geophysical Research. – American Geophysical Union, 1998. – Vol. 103. – P. 14059-14108.
- 111. Takahashi T. Riming electrification as a charge separation mechanism in thunderstorms // Journal of the Atmospheric Sciences. – American Meteorological Society, 1978. – Vol. 35. – P. 1536-1548.
- 112. Vonnegut B., Moore C.B., Harris C.K. Agrimeter for measurement of atmospheric electrical potential gradient // Journal of Meteorology. – American Meteorological Society, 1961. – Vol. 18. – P. 812-814.
- 113. Whipple F.J.W., Chalmers J.A. On Wilson's theory of the collection of charge by

falling drops // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1944. – Vol. 70. – P. 103-119.

- 114. Wilson C.T.R. Some thundercloud problems // Journal of The Franklin Institute,
  1929. Vol. 208. P. 1-12.
- 115. Winn W.P. Aircraft measurement of electric field: self-calibration // Journal of Geophysical Research – American Geophysical Union, 1993. – Vol. 98. – P. 7351-7365.
- 116. Zhang T., Yu H., Zhou F., Chen J., Zhang M. Measurements of vertical electric field in a thunderstorm in a Chinese inland plateau // Annales Geophysicae. – 2018. – Vol. 36. – P. 979-986.