

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
им. А.И. ВОЕЙКОВА» (ФГБУ «ГГО»)

УДК 551.510

На правах рукописи

Зайнетдинов Булат Гаянович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГЛОБАЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ В АТМОСФЕРЕ НА
ВЫСОКОШИРОТНЫХ СТАНЦИЯХ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ
АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Специальность: 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2025

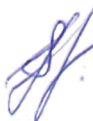
Научный руководитель:	Морозов Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Отдел геофизического мониторинга и исследований, ФГБУ «ГГО», г. Санкт-Петербург
Официальные оппоненты:	Нагорский Петр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики климатических систем ФГБУН «ИМКЭС СО РАН», г. Томск Юсупов Игорь Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Учебная лаборатория радиофизики, ФГБОУ ВО «СПбГУ», г. Санкт-Петербург
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «АНИИ»)

Защита диссертации состоится «29» мая 2025 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.365.02 по адресу 195196, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте:
<https://rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «___» _____ 202_ года.

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



Т.С. Ермакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы исследования глобальной электрической цепи (ГЭЦ) играет важную роль в изучении физики атмосферы, поскольку связи между наблюдаемыми характеристиками атмосферы пока еще до конца не прояснены. Длительные наблюдения за элементами атмосферного электричества указывают на возможность изменения данных элементов при изменении технической инфраструктуры государственного масштаба (строительство новых АЭС, качественное изменение промышленного потенциала страны, резкое увеличение автомобильного транспорта и т.п.). Поскольку полярные области являются наименее подверженными антропогенной нагрузке, информацию, получаемую с данных регионов, можно считать фоновыми и использовать при оценке изменений в глобальном масштабе.

Климатические изменения, ведущие в том числе и к трансформации так называемого электроклимата Земли, а именно к количественному и пространственному распределению гроз, могут сказаться на изменении в значении напряженности электрического поля атмосферы, поскольку среднее значение напряженности электрического поля у земли определяется, в основном, действием совокупного количества гроз, протекающих на Земном шаре в каждый момент времени. Предполагаемые изменения могут быть обнаружены только в результате длительных и сопоставимых во времени и пространстве наблюдений.

Помимо всего прочего, не следует отвергать возможность преднамеренных воздействий на окружающую нас среду, приводящих к аномальным изменениям электрических параметров, раннее распознавание которых представляется весьма важным и необходимым.

Целью диссертационной работы является исследование пространственно-временных вариаций электрических характеристик атмосферы (ЭХА) в высокоширотных регионах, а также изучение теоретического и экспериментального влияния концентрации аэрозольных частиц субмикронного диапазона в приземном слое на ЭХА.

Для достижения поставленных целей был выполнен ряд инженерных, научных и методических **задач**:

- Разработка теоретической модели, описывающей влияние слоев аэрозольных частиц в атмосфере на значения напряженности электрического поля в приземном слое. Численное решение данной модели для различных значений коэффициента поглощения ионов.

- Создание автоматизированной системы непрерывного наблюдения за ЭХА, такими как напряженность электрического поля приземного слоя атмосферы и электрическая проводимость воздуха, обусловленная положительными и отрицательными аэроионами. Создание сети станций наблюдения за ЭХА в высокоширотной зоне РФ. Внедрение руководящего документа, регламентирующего работу с системой наблюдения;

- Сбор, систематизация и анализ длительных, непрерывных рядов данных об ЭХА, а также сопутствующей метеорологической информации и данных о концентрации атмосферных аэрозолей. Формулирование критериев выборки характерных для отсутствия метеорологических явлений, приводящих к возмущениям напряженности электрического поля;

- Выделение полных суток, соответствующих условиям «хорошей погоды» для оценки влияния аэрозольных частиц субмикронного диапазона на унитарную вариацию напряженности поля, а также его вклада в поведение электрической проводимости воздуха.

Предметом исследования являются проявления эффектов колебания ионосферного потенциала, рассчитанные теоретически, на напряженность электрического поля в приземном слое атмосферы в условиях «хорошей погоды».

Объектом исследования является слой атмосферы от поверхности Земли до верхней границы ионосферы, как в локальном, так и в глобальном масштабе.

Методами исследования являлись:

Для теоретической части: моделирование влияния аэрозольных частиц на ЭХА, а также численное решение полученной модели.

Для практической части: сбор, систематизация и анализ длительных рядов данных об ЭХА, сопутствующей метеорологической информации, а также данных о спектре распределения аэрозольных частиц субмикронного диапазона в приземном слое атмосферы. При этом анализировались результаты совместных наблюдений за ЭХА и концентрацией аэрозоля в дни, удовлетворяющие условиям «хорошей погоды», с целью выявления закономерностей между данными параметрами.

Также были проведены эксперименты, позволяющие проверить различные теоретические оценки, такие как наличие суточной вариации напряженности электрического поля в условиях «хорошей погоды» и влияние аэрозольных частиц на суточный и сезонный ЭХА.

Научная новизна состоит в том, что впервые анализируются результаты наблюдений за ЭХА в приземном слое, полученные с высокоширотной сети станций. При этом данные, получаемые на данной сети, являются многолетними и непрерывными. Стоит учесть, что наблюдения осуществляются при помощи одинаковой аппаратуры, внесенной в государственный реестр средств измерений, а также проводятся по единой методике, утвержденной Росгидрометом. В ходе работы также получены нижеследующие научные и практические результаты:

1. Разработана стационарная модель влияния слоев аэрозольных частиц в воздухе на элементы глобальной электрической цепи в атмосфере. Получены теоретические оценки данного влияния в зависимости от высоты слоя частиц при различных значениях коэффициента поглощения ионов.

2. Впервые введена в эксплуатацию непрерывно работающая, автоматизированная сеть станций в высокоширотном регионе Северного полушария Земли.

3. Разработан способ фильтрации данных наблюдений для получения значений напряженности электрического поля близких по значению к значениям, получаемым в условиях отсутствия метеорологических явлений.

4. Получены результаты анализа многолетних наблюдений, которые не противоречат устоявшимся представлениям об унитарной

вариации, и хорошо согласуются с теоретическими оценками элементов глобальной электрической цепи.

5. Получены экспериментальные доказательства влияния атмосферного аэрозоля субмикронного диапазона на ЭХА. Показано, что общепринятые критерии «хорошей погоды», получаемые при наблюдениях на метеостанциях, не являются исчерпывающими при попытке получить классический ход кривой Карнеги.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Теоретическая модель влияния аэрозольных частиц в областях хорошей погоды на глобальную электрическую цепь в атмосфере. Аэрозоль в приземном слое атмосферы рассматриваются как слагаемое, входящее в полное сопротивление столба атмосферы. Генераторы электрического поля, поддерживающие ГЭЦ, не учитываются, а входят через граничное условие на верхней границе ионосферы в виде задания величины потенциала ионосферы.

2. Зависимость коэффициента поглощения ионов от концентрации аэрозольных частиц. С ростом числа частиц рассматриваемый коэффициент убывает.

3. Теоретическая зависимость напряжённости электрического поля в областях, со слоями аэрозольных частиц от напряжённости в областях с чистой атмосферой для различных значений коэффициентов поглощения ионов и высоты верхней границы слоя аэрозоля.

4. Статистически значимые критерии для получения данных о напряженности электрического поля атмосферы, получаемых в период действия метеорологических явлений, вызывающих сильные возмущения во временном ходе.

5. Экспериментальные оценки влияния аэрозольных частиц субмикронного диапазона на измерение напряженности электрического поля «хорошей погоды».

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы подтверждается:

- строгой постановкой задач, актуальностью и применяемыми методами;
- многолетним объемом анализируемой информации;

– наблюдениями, проводимыми согласно утвержденным методикам, как за элементами ЭХА, так и за метеорологическими параметрами;

– отсутствием противоречия физико-математическим моделям, а также общепринятым представлениям в данной области знаний.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.6.18 – «Науки об атмосфере и климате» по следующим пунктам:

1. Методы наблюдений, измерений и обработки данных об атмосфере и климатической системе.

2. Электрические явления в атмосфере. Глобальная электрическая цепь. Ионизация. Проводимость. Ток. Градиент потенциала.

3. Состав атмосферы. Водяной пар, газовые примеси, аэрозоли. Загрязнение атмосферы.

4. Физика нижней атмосферы Земли. Физика верхней атмосферы и ионосферы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

– итоговых сессиях ученого совета Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова;

– Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (Борок, 2015);

– V Всероссийской научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (СПб, 2018);

– Молодежных научных чтений «Наука и техника, общество и культура: проблемы конвергентного развития» (Таганрог, 2018);

– VIII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству с международным участием (Нальчик, 2019);

– XI Международной конференции «Солнечно-Земные связи и физика предвестников землетрясений» (Паратунка 2020);

- VIII Международной научно-практической конференции «Полярные чтения» (СПб, 2020);
- XXIII Всероссийской школе-конференции молодых ученых САТЭП «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Борок, 2020);
- XV Международной Школе молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (Томск, 2022);
- IV Международной научной конференции «Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды» (Ставрополь, 2022);
- XI Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (Нижний Архыз, 2022);
- VII Всероссийской научной конференции "Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды" (СПб, 2022);
- IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству (СПб, 2023);
- Восьмом Всероссийском объединенном метеорологическом и гидрологическом съезде (СПб, 2024).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 статей в четырех журналах, рекомендованных перечнем ВАК: «Оптика атмосферы и океана», «Метеорология и гидрология», «Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова», «Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского». Помимо статей в научных журналах в соавторстве публикуются разделы для ежегодных обзоров Росгидромета о состоянии окружающей среды над территорией РФ, а также Арктической зоны, индексируемых РИНЦ (всего 20 публикаций). Также в соавторстве был подготовлен раздел в монографию «Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС «Ледовая база Мыс Баранова»

Личный вклад автора. В соавторстве разработана теоретическая модель влияния слоев аэрозольных частиц на напряженность электрического поля. Расчет зависимости коэффициента поглощения ионов от концентрации аэрозольных

частиц, а также численная оценка зависимости напряженности электрического поля от высоты верхней границы аэрозольного слоя для различных значений данного коэффициента проводились автором. Автор принимал непосредственное участие в разработке комплекса измерительной аппаратуры для наблюдения за ЭХА. Тестирование, установка, пусконаладочные работы на всей сети станций кроме «ЛБ мыс Баранова» были проведены автором. В настоящее время автор является руководителем научно-методического сопровождения сети наблюдений за ЭХА, подведомственной Росгидромету. Все научные результаты, выносимые на защиту, получены автором по личной инициативе. Критерии фильтрации данных о напряженности электрического поля являются авторской разработкой.

Помимо прочего, автором подготовлены материалы для докладов на научных конференциях, а также публикаций в различные журналы, монографию и обзоры Росгидромета о состоянии окружающей среды.

Теоретическая и практическая значимость.

1. Работа может служить методологической базой при изучении эффектов проявления ГЭЦ в приземном слое.

2. Результаты работы могут быть использованы при анализе данных об ЭХА при определении фоновых значений.

3. Полученные результаты могут использоваться при оценке возможных изменений, вызванных антропогенными или естественными факторами, как в локальном, так и в глобальном масштабе.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений и списка литературы. Объем работы составил 125 страницы, включает в себя 76 формул, 26 рисунков, 14 таблиц. Список цитируемой литературы включает 110 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования глобальной электрической цепи, сформулированы цели работы, поставлены задачи, обозначены предмет, объект и методы

исследований. Показаны теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также структура и объем диссертации.

В **первой главе** представлен обзор состояния исследований ГЭЦ. Рассмотрена история возникновения данного термина, который введен Роблом и Хейсом на основании разработанной ими теоретической модели совокупных токовых генераторов, работающих в атмосфере.

Также в главе приведены данные о современном состоянии исследований ГЭЦ, так, например, рассмотрена современная модель, представляющая Земной шар, как один большой сферический конденсатор. Обкладками данного конденсатора являются проводящие поверхности Земли и ионосферы. Показаны основные генераторы, действующие в атмосфере, это и грозовой генератор, и ионосферно-магнитосферный генератор. Помимо этого, учитываются все известные на данный момент ионизирующие эффекты, поддерживающие электрическую проводимость атмосферы, такие как эманации радона в приземном слое, а также галактические и солнечные космические лучи в верхних слоях атмосферы. Данная модель также учитывает орографические особенности подстилающей поверхности.

Далее в главе рассмотрено понятие электродного эффекта, возникающего в приземном слое. Данный эффект определяет электрическое состояние приземного слоя посредством образования объемных зарядов за счет тока проводимости, обусловленного положительными аэроионами, который возникает в условиях «хорошей погоды». Кроме того, дан обзор работ, посвященных экспериментальному изучению влияния на электродный слой объемного заряда, вызванного различными процессами, протекающими в возмущенной атмосфере.

Также рассмотрены экспериментальные работы по исследованию ГЭЦ. Представлены результаты как экспедиционных исследований, так и результаты непрерывных наблюдений, проводимых на пунктах в различных географических районах, в том числе и в высокоширотных регионах Арктики и Антарктики.

Отдельное внимание уделено сетевым видам наблюдений. Рассмотрены как исторические сети наблюдения за ЭХА, так и существующие на данный момент. Примечательно, что помимо региональных (национальных) сетей также существует и глобальная сеть мониторинга. Показано, что на данный момент отсутствуют многопунктовые наблюдения в высоких широтах кроме тех, которые проводятся на сети станций Росгидромета.

Во **второй главе** рассматриваются основные физико-математические модели ГЭЦ. Так, одной из первых моделей была введенная еще в 20-х годах XX века модель сферического конденсатора, получившая название модели Вильсона. Показано, что моделирование ГЭЦ основывается на классической системе уравнений Максвелла.

Рассмотрен баланс токов в атмосфере, показано, что в районах занятых грозовыми генераторами текут токи, заряжающие атмосферу, тогда как в районах свободной атмосферы текут токи разрядки.

Отдельно представлена разработанная теоретическая модель влияния слоев аэрозольных частиц в атмосфере на элементы глобальной электрической цепи. В данной модели аэрозоль в приземном слое атмосферы рассматривается как слагаемое, входящее в полное сопротивление столба атмосферы. При этом генераторы электрического поля, поддерживающие ГЭЦ, не учитываются, а вводятся через граничное условие на верхней границе ионосферы в виде задания величины потенциала атмосферы ионосферы.

Модель допускает сферическое приближение Земли и, как следствие, рассматривает уравнение $\nabla(\lambda(r)\nabla\varphi) = 0$ в сферической системе координат с началом в центре Земли:

$$\lambda(r) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

где λ – электрическая проводимость воздуха, обусловленная положительными и отрицательными аэроионами; φ – электрический потенциал; r – расстояние от центра Земли.

В дальнейшем, электрическая проводимость рассматривается в виде двух областей:

$$\lambda(r) = \eta \lambda_0 e^{\alpha(r-r_0)}, \quad r - r_0 \in [0, H) \text{ (область I)}, \quad (2)$$

$$\lambda(r) = \lambda_0 e^{\alpha(r-r_0)}, \quad r - r_0 \in [H, H_0] \quad (\text{область II}),$$

где: η – коэффициент поглощения аэроионов, который характеризует уменьшение проводимости в области I за счет присутствия аэрозольных частиц, r_0 – радиус сферической Земли, H_0 – высота нижней границы ионосферы (60-70км), $\alpha = (0,2 - 0,3)\text{км}^{-1}$.

Граничные условия для решения данной задачи представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_{r-r_0=0} &= 0, \\ \varphi|_{(r-r_0)=H_0} &= \varphi_\infty \end{aligned} \quad (3)$$

Кроме того, при $r - r_0 = H$ необходимо использовать равенство потенциалов для решений, полученных в областях I и II, и плотности электрического тока на этой границе. Для проводимости, задаваемой соотношениями (2), уравнение (1) при $r \gg \alpha^{-1}$ сводится к следующему:

$$\frac{d}{dr} \left(\lambda \frac{d\varphi}{dr} \right) = 0 \quad (4)$$

Интегрируя это уравнение по областям I и II, получим соответственно:

$$\varphi_1(r) = -\frac{C_1}{\eta\alpha\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} + C_2 \quad (5)$$

$$\varphi_2(r) = -\frac{C_3}{\alpha\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} + C_4, \quad (6)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные интегрирования.

Используя второе граничные условия (3) и принимая потенциал электрического поля и плотность тока непрерывным, для радиальной составляющей напряженности электрического поля в области I получим:

$$E_{r1}(r) = -\frac{\alpha\varphi_\infty e^{-\alpha(r-r_0)}}{1 - e^{-\alpha H} + \eta(e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0})} \quad (7)$$

А в области II имеем:

$$E_{r2}(r) = -\frac{\alpha\varphi_\infty e^{-\alpha(r-r_0)}}{1 - e^{-\alpha H} + (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0})} \quad (8)$$

Необходимо отметить, что потенциал ионосферы при наличии аэрозольных частиц в атмосфере связан с потенциалом в условиях

незагрязненной атмосферы соотношением $\varphi_{\infty}^a = \frac{\varphi_{\infty}^0}{\eta}$, то есть при $\eta < 1$ он возрастает.

При $H < 1/\alpha$, $H_0 \rightarrow \infty$ получим в области I выражение для напряженности электрического поля:

$$E_{r1} = -\frac{\alpha\varphi_{\infty}}{\eta} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (9)$$

Дальнейший раздел посвящен влиянию аэрозольных частиц на электрическую проводимость атмосферы в виде уравнения ионизационно-рекомбинационного баланса, а также определению коэффициента поглощения ионов (η), полученного при решении данного уравнения для различного типа ионов.

Получены численные зависимости напряженности электрического поля от высоты верхней границы аэрозольного слоя для различных значений η (Таблица 1).

Таблица 1

Высота верхней границы аэрозольного слоя	100 м	500 м	1000 м
Зависимость E_{r1} от напряженности в чистой атмосфере при $\eta = 0,82$	1,21	1,18	1,15
Зависимость E_{r1} от напряженности в чистой атмосфере при $\eta = 0,2$	4,46	3,22	2,45

В **третьей главе** обосновывается принцип выбора станций для проведения анализа, который основан на географических особенностях их расположения. Поскольку станции расположены вдалеке от крупных промышленных объектов, антропогенное влияние на них минимально, следовательно, данные станции можно рассматривать, как фоновые.

Далее в главе подробно описан атмосферно-электрический измерительный комплекс, который состоит из измерителя напряженности электрического поля атмосферы «Поле-2М» и измерителя удельной электрической проводимости воздуха «Электропроводность-2М». Также в главе дано описание мест установки измерительной аппаратуры и методика проведения наблюдений, основанная на РД 52.04.168-2017.

В последующих параграфах данной главы проводится статистический сравнительный анализ данных наблюдений с данными о метеорологических явлениях за весь период проведения наблюдений за ЭХА на станциях Тикси и Диксон. Получено статистическое распределение E характерное для различных метеорологических явлений (рис. 1).

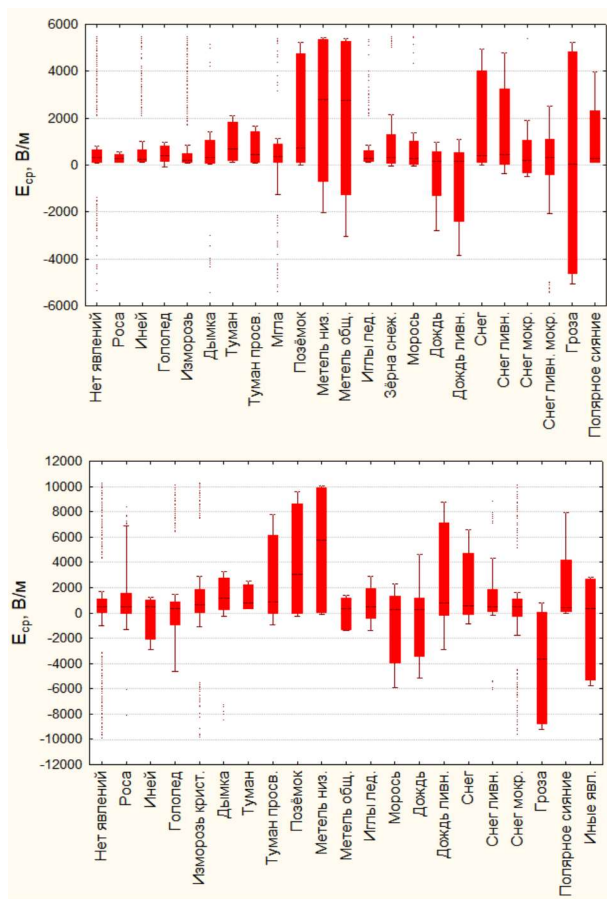


Рисунок 1 – Статистическое распределение $E_{ср}$ для ГМО Тикси (а) и ОГМС Диксон (б) при различных метеорологических явлениях

На основе данного распределения обосновываются критерии создания выборки в периоды отсутствия метеоявлений. Таким образом для станций Тикси и мыс Баранова лежат в следующих пределах:

$$\begin{cases} 140 \leq E_{\text{ср}} \leq 630 \\ 10 \leq \Delta E \leq 130 \end{cases}$$

для станции Диксон:

$$\begin{cases} 40 \leq E_{\text{ср}} \leq 1100 \\ 10 \leq \Delta E \leq 220 \end{cases}$$

где $E_{\text{ср}}$ – среднее значение напряженности электрического поля за минуту, ΔE – разница между максимальным и минимальным значением E за минуту.

Далее приведены сравнительные результаты, полученные при введении данных критериев, с данными, полученными в дни, когда отсутствовали метеоявления. Показано, что для обеих станций

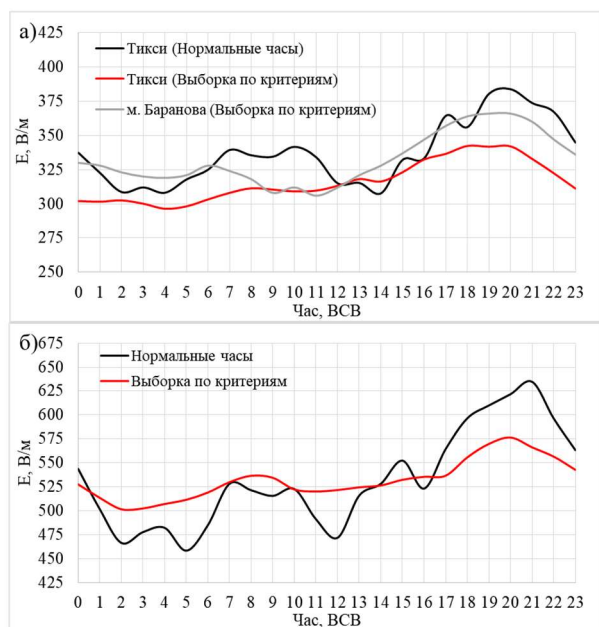


Рисунок 3.9 – Сравнение результатов выборок значений E для нормальных часов и с применением критериев выборки: а) ГМО Тикси и НИС «ЛБ мыс Баранова»; б) ОГМС Диксон.

вечерний максимум унитарной вариации для отфильтрованных данных более пологий нежели у значений при отсутствии явлений, но, в целом, результаты показывают достаточную повторяемость рядов (рис.2).

Также приведены данные наблюдений после применения фильтра для всех анализируемых пунктов. При этом критерий выборки для станции мыс Баранова использовался тот же, что и для станции Тикси ввиду схожих условий установки выносных блоков измерителей «Поле-2М». Показано, что результаты имеют достаточную согласованность и доказывают наличие унитарной вариации, являющуюся основным показателем наличия глобальной электрической цепи в атмосфере.

В **четвертой** главе рассмотрены экспериментальные данные о влиянии аэрозольных частиц субмикронного диапазона на ЭХА. Дано определение понятию атмосферного аэрозоля, особенностям его возникновения, влиянию на жизнедеятельность человека.

Также дано описание эксперимента по совместному наблюдению за ЭХА и концентрацией аэрозольных частиц на ГМО Тикси. Проанализированы сезонные вариации концентрации и ЭХА, выявлены циклические закономерности данных параметров. При этом сезонный ход электрической проводимости для всех станций, расположенных в полярном регионе, имеет идентичный вид с максимумом в июле-сентябре и минимумом в феврале-апреле. При этом график концентрации аэрозоля находится в противофазе колебаниям электропроводности воздуха, что объясняется таким феноменом, как арктическая дымка.

Помимо сезонных вариаций были рассмотрены унитарные колебания для отдельно взятых суток. За весь период совместных наблюдений были выделены все дни, удовлетворяющие критериям «хорошей погоды» и построены временные ходы анализируемых параметров. Показано, что в те дни, когда суточный ход концентрации аэрозольных частиц находился в пределах фоновых значений для данной местности, вариации напряженности электрического поля имели достаточно выраженный ход кривой Карнеги. В те же дни, когда колебания концентрации значительно превышали фоновые, создавался объемный заряд, который искажал электрическое поле,

вследствие чего вариации могли иметь совершенно произвольный характер.

На рисунке 3 представлены подряд два дня, удовлетворяющие условиям «хорошей погоды», что случается крайне редко для данного

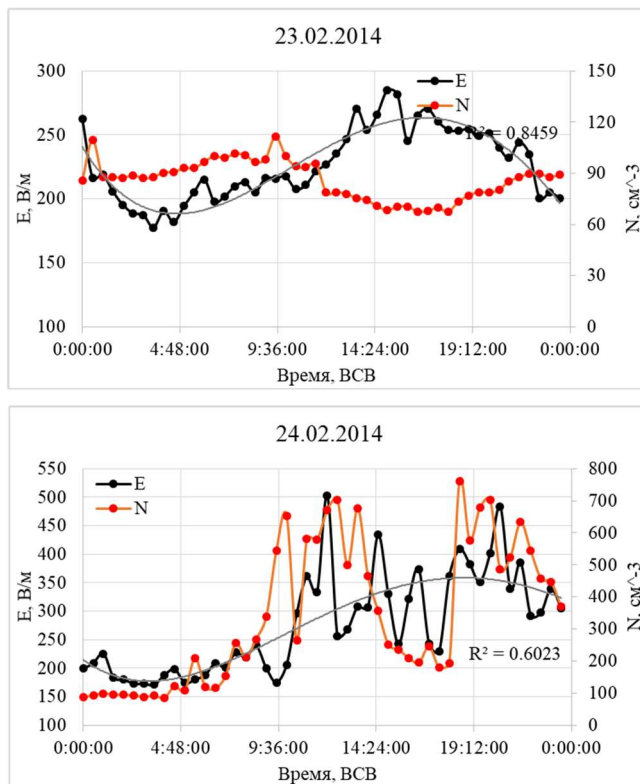


Рисунок 3 – Динамика напряженности электрического поля атмосферы, суммарной электрической проводимости воздуха и концентрации аэрозольных частиц в течение 2-х суток.

региона. Анализ стандартных метеорологических параметров показывает, что в течение указанных дат не было никаких предпосылок для возникновения аэрозоля, кроме роста атмосферного давления. Предположительно аэрозольные частицы могли появиться

из верхних слоев атмосферы за счет нисходящих потоков воздуха, ближе к центру антициклона.

Как итог, в данной главе было показано, что общепризнанных критериев электричества «хорошей погоды», которые опираются на стандартные метеовеличины бывает недостаточно, чтобы можно было выделить классический ход унитарной вариации напряженности электрического поля в отдельно взятых сутках.

В заключении представлены основные научные результаты, полученные в диссертационной работе, которые заключаются в следующем:

1. Разработана теоретическая модель влияния аэрозольных частиц в областях хорошей погоды на ГЭЦ, получено ее аналитическое решение. Столб атмосферы рассматривается в виде двух областей I область представляет из себя слой, занятый атмосферным аэрозолем, II область – слой свободный от аэрозольных частиц. При этом генераторы электрического поля, поддерживающие ГЭЦ, не учитываются, а входят через граничное условие на верхней границе ионосферы в виде задания величины потенциала ионосферы.

2. Рассчитаны значения коэффициента поглощения ионов для различных концентраций аэрозольных частиц. Показано как влияют аэрозольные частицы в приземном слое атмосферы на радиальную составляющую напряженности электрического поля. Результаты теоретического рассмотрения и численных оценок показывают, что присутствие аэрозольных частиц в атмосфере приводит при их достаточной концентрации к увеличению как столбцового, так и глобального электрического сопротивления, а также потенциала ионосферы.

3. Разработано автоматизированное оборудование для измерения ЭХА таких, как напряженность электрического поля приземного слоя атмосферы и полярной электрической проводимости воздуха, обусловленной положительными и отрицательными аэроионами. Проведены испытания с целью утверждения типа средств измерений, получены методики поверки и, как следствие, оборудование внесено в государственный реестр средств измерений.

4. Произведена автоматизация и расширение сети наблюдений за ЭХА на территории РФ. Впервые в мировой практике создана постоянно действующая под общим методическим руководством и с применением одинакового измерительного оборудования сеть наблюдений в арктическом регионе.

5. В результате анализа многолетнего массива данных наблюдений за 50-летний период показано, что выявление кривой Карнеги на станциях городского и континентального типа достаточно затруднительно. В свою очередь, для станций полярных регионов, чтобы получить данную кривую, достаточно лишь исключить периоды опасных метеорологических явлений.

6. Получены статистически значимые критерии для значений E_{cp} и ΔE в условиях отсутствия метеоявлений. Данные критерии показали возможность их применения в оперативной практике для автоматизации обработки поступающей информации об атмосферно-электрических характеристиках, а также ее контроля для каждой отдельно взятой станции.

7. В ходе многолетних параллельных наблюдений за ЭХА и счетной концентрацией аэрозольных частиц субмикронного диапазона в приземном слое была выявлена обратная сезонная зависимость между $\sum \lambda$ и N , подтверждающая теоретические модели.

8. Было показано, что для выявления классического хода унитарной вариации для некоторых дней, удовлетворяющих условиям «хорошей погоды», которые общепризнаны в науках об атмосферном электричестве, достаточно данных наблюдений стандартных метеопараметров. Но для большинства дней подобная метеоинформация хоть и является основным индикатором, но наличие аэрозольных частиц, концентрация которых превышает некоторое фоновое значение или имеет резкие выбросы во временном ходе, вносит сильные возмущения в соответствующий ход E . Как следствие, исследование электричества «хорошей погоды» не является в полной мере объективным без привлечения информации об аэрозольном загрязнении.

9. На примере интенсивных пожаров в Иркутской области и периоде ослабления хозяйственной деятельности в рамках проведения мер по предотвращению распространения

коронавирусной инфекции COVID-19 было показано, как влияет наличие или отсутствие аэрозоля на результаты фонового мониторинга ЭХА.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Зайнетдинов Б.Г. Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе. // Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 47-61

2. Зайнетдинов Б.Г., Соколенко Л.Г. Результаты модернизации и расширения сети наблюдений за атмосферным электричеством. // Труды ГГО. 2018. Вып. 589. С. 153-166

3. Морозов В.Н., Зайнетдинов Б.Г., Соколенко Л.Г. Глобальная электрическая цепь в атмосфере: теоретические модели и экспериментальные данные, подтверждающие их. // Труды ГГО. 2018. Вып. 589. С. 98-113

4. Морозов В.Н., Зайнетдинов Б.Г., Соколенко Л.Г., Палей А.А., Писанко Ю.В. Экспериментальные и теоретические исследования влияния аэрозольных частиц субмикронного аэрозоля на электричество приземного слоя. // Труды ГГО. 2018. Вып. 590. С. 27-47

5. Зайнетдинов Б.Г., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Формирование суточных вариаций атмосферного электрического поля вблизи поверхности земли в различных метеорологических условиях. // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. 2020. № S674. С. 176-180

6. Зайнетдинов Б.Г., Соколенко Л.Г., Занюков В.В. Изменение электрических характеристик атмосферы в разных географических регионах в период ослабления хозяйственной деятельности весной 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2022. Вып. 3. С. 47-54

7. Zainetdinov B.G., Zaniukov V.V., Sokolenko L.G. Changes in Atmospheric Electricity Characteristics in Different Geographic Regions during the Economic Activity Decline in the Spring of 2020 // Russ.

Meteorol. Hydrol. 2022. Vol. 47, № 3. P. 191–196. DOI: 10.3103/S1068373922030049.

8. Зайнетдинов Б. Г. Критерии выборки данных об атмосферном электричестве для полярных регионов в целях автоматизации их обработки и контроля. // Труды ГГО. 2023. № 610. С. 113–125.

9. Зайнетдинов Б. Г., Морозов В. Н., Занюков В. В. Влияние аэрозольных частиц в приземном слое воздуха на элементы глобальной электрической цепи в атмосфере. // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 05. С. 409–414. DOI: 10.15372/AOO20240508.

10. Zainetdinov B. G., Morozov V. N., Zaniukov V. V. The Influence of Aerosol on Elements of Global Atmospheric Electrical Circuit // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. Vol. 31, № 4. P. 508–513. DOI: 10.1134/S1024856024700684.

11. Занюков В. В., Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. Многолетние тенденции и современные изменения параметров атмосферного электричества. // Труды ГГО. 2024. № 612. С. 136–154.

Труды конференций:

12. Зайнетдинов Б.Г., Попов И.Б., Соколенко Л.Г. О результатах модернизации атмосферно-электрической сети станций Росгидромета. II Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь», Борок, 5-9 октября 2015, стр. 108-109.

13. Зайнетдинов Б.Г. Анализ данных наблюдений за напряженностью электрического поля приземного слоя атмосферы на прибрежных станциях Северного Ледовитого океана. V Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»: Материалы конференции. Часть 1, СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018, стр. 139-143.

14. Зайнетдинов Б. Г. Сетевые наблюдения за электрическими характеристиками атмосферы, как элемент комплексного мониторинга аэрозольного и радиоактивного загрязнений // Сборник материалов Молодежных научных чтений: в 2 частях Южный федеральный университет. Таганрог: ЮФУ, 2018. С. 191–195.

15. Кудринская Т. В., Куповых Г. В., Аджиев А. Х., Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. Эффекты солнечной активности в вариациях электрического поля приземной атмосферы. Труды XXVI всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн». Том 2, Казань, 1–6 июля 2019 г., стр. 557-561

16. Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. Итоги усовершенствования сети Росгидромета по наблюдениям за электрическими характеристиками атмосферы // Сборник трудов конференции. Нальчик: ВКА им. Можайского, 2019. С. 7–9.

17. Кудринская Т. В., Куповых Г. В., Аджиев А. Х., Зайнетдинов Б. Г. Исследование проявлений солнечно-земных связей в динамике приземного атмосферно-электрического поля. Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. Сборник тезисов докладов XI международной конференции «Солнечно-Земные связи и физика предвестников землетрясений», Паратунка, 22-25 сентября 2020 г., С. 13-14.

18. Зайнетдинов Б. Г., Михайловский Ю. П., Соколенко Л. Г., Стерхов П. Л. Наземные и самолётные исследования электрических характеристик атмосферы в Советской и Российской Арктике. Прошлое, настоящее, будущее // Материалы Восьмой Международной научно-практической конференции «Полярные чтения». СПб: Изд. «Паулсен», 2020. С. 118–125.

19. Зайнетдинов Б. Г. Суточные и сезонные вариации параметров атмосферного электричества в различных регионах РФ // тезисы докладов XXIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Борок: ООО «Филигрань», 2020. С. 21–22.

20. Кашлева Л.В., Мацуцина Ю. С., Михайловский Ю. П., Зайнетдинов Б. Г. Моделирование электрических характеристик невозмущенной атмосферы. Материалы конференции: Динамика и взаимодействие геосфер земли. Том 1. Томск, 2021. С. 143-145.

21. Зайнетдинов Б. Г., Занюков В. В., Соколенко Л.Г. Результаты совместных многолетних наблюдений за концентрацией аэрозоля субмикронного диапазона и электрическими характеристиками атмосферы в п. Тикси. Материалы XV Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. Томск, 2022. С.18-22.

22. Занюков В. В., Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. Особенности изменения электрических характеристик приземного слоя атмосферы как интегрального показателя аэрозольного загрязнения в период проведения карантинных мер по предупреждению распространению COVID-19. Труды конференции «Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды», Ставрополь, 2022. С. 51-54.

23. Зайнетдинов Б. Г., Занюков В. В., Соколенко Л.Г. Влияние аэрозольных частиц на унитарную вариацию напряженности электрического поля по результатам наблюдений в п. Тикси. Материалы VII всероссийской научной конференции "Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды", Санкт-Петербург, 2022. С. 225-228.

24. Морозов В.Н., Зайнетдинов Б.Г., Занюков В.В. Влияние аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь. Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». Нижний Архыз, 2022. С. 304-309.

25. Зайнетдинов Б.Г., Занюков В.В., Соколенко Л.Г. Результаты фонового мониторинга электрического состояния приземного слоя атмосферы над территорией российской федерации с использованием новых автоматизированных средств измерений. Материалы IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству / под общ. ред. Ю. В. Кулешова. СПб.: Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 2023. С. 101-109.

Публикации в иных изданиях:

26. Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г., Попов И. Б. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2013 год. Москва: ГГИ, 2014. С. 41-44.

27. Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г., Попов И. Б. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2014 год. Москва: ГГИ, 2015. С. 41-44.

28. Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г., Попов И. Б. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы // Обзор

состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2015 год. Москва: ГГИ, 2016. С. 41-44.

29. Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г., Попов И. Б. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2016 год. Москва: ГГИ, 2017. С. 40-43.

30. Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы // Обзор состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2017 год. Москва: ИГКЭ, 2018. С. 27–30.

31. Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2017 год. Москва: ГГИ, 2018. С. 34–36.

32. Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы // Обзор состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2018 год. Москва: ИГКЭ, 2019. С. 29–31.

33. Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г., Занюков В. В. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы // Обзор состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2021 год. Москва: ИГКЭ, 2022. С. 29–31.

34. Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. Результаты пилотных наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» // Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС «Ледовая база Мыс Баранова». СПб: ААНИИ, 2021. С. 77–83.