

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)

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

На правах рукописи

УДК 551.510

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., г.н.с. ФГБУ «ГГО»

Морозов Владимир Николаевич

Санкт-Петербург

2024

# Содержание

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Содержание .....                                                                                                                                                  | 2  |
| Список условных обозначений и сокращений .....                                                                                                                    | 4  |
| Введение .....                                                                                                                                                    | 6  |
| 1. Современное состояние теоретических и экспериментальных исследований<br>глобальной электрической цепи .....                                                    | 18 |
| 1.1. Возникновение термина глобальная электрическая цепь .....                                                                                                    | 18 |
| 1.2. Теоретические исследования ГЭЦ .....                                                                                                                         | 19 |
| 1.3. Электродный слой в атмосфере .....                                                                                                                           | 23 |
| 1.4. Экспериментальные исследования ГЭЦ .....                                                                                                                     | 25 |
| 1.5. Сетевые наблюдения за электрическими характеристиками атмосферы .                                                                                            | 27 |
| Выводы к главе 1 .....                                                                                                                                            | 34 |
| 2. Физико-математическое моделирование глобальной электрической цепи .....                                                                                        | 35 |
| 2.1. Основные уравнения, используемые при моделировании ГЭЦ .....                                                                                                 | 35 |
| 2.2. Электрическая проводимость атмосферы .....                                                                                                                   | 37 |
| 2.3. Модели глобальной электрической цепи .....                                                                                                                   | 42 |
| 2.4. Влияние слоев аэрозольных частиц на ГЭЦ .....                                                                                                                | 57 |
| 2.5. Связь электрической проводимости воздуха с концентрацией аэрозольных<br>частиц .....                                                                         | 61 |
| 2.6. Определение коэффициента поглощения ионов $\eta$ .....                                                                                                       | 61 |
| Выводы к главе 2 .....                                                                                                                                            | 64 |
| 3. Экспериментальные исследования временных вариаций ЭХА в арктических<br>районах. Возможность выделения глобальной суточной вариации напряженности<br>поля. .... | 65 |
| 3.1. Обоснование выбора станций для анализа .....                                                                                                                 | 65 |
| 3.2. Оборудование для проведения наблюдений .....                                                                                                                 | 71 |
| 3.3. Условия проведения наблюдений .....                                                                                                                          | 74 |
| 3.4. Обоснование критериев создания выборки .....                                                                                                                 | 77 |
| 3.5. Проверка полученных критериев .....                                                                                                                          | 86 |

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Выводы к главе 3 .....                                                                                                      | 90  |
| 4. Влияние аэрозольных частиц субмикронного диапазона на локальные проявления элементов глобальной электрической цепи ..... | 92  |
| 4.1. Понятие атмосферного аэрозоля .....                                                                                    | 92  |
| 4.2. Описание эксперимента .....                                                                                            | 93  |
| 4.3. Особенности распределения атмосферного аэрозоля на станции Тикси..                                                     | 95  |
| 4.4. Экспериментальные исследования влияние аэрозольных частиц на электричество приземного слоя .....                       | 98  |
| 4.5. Проявление эффекта воздействия аэрозольных частиц в рамках фонового мониторинга ЭХА .....                              | 104 |
| Выводы к главе 4 .....                                                                                                      | 108 |
| Заключение.....                                                                                                             | 109 |
| Список используемой литературы.....                                                                                         | 112 |

## Список условных обозначений и сокращений

|       |   |                                                                 |
|-------|---|-----------------------------------------------------------------|
| ААНИИ | - | Арктический и антарктический научно-исследовательский институт; |
| АИК   | - | Аспирационно-измерительный конденсатор;                         |
| АЦП   | - | Аналогово-цифровой преобразователь;                             |
| АЭИК  | - | Атмосферно-электрический измерительный комплекс;                |
| БПС   | - | Блок питания и сопряжения;                                      |
| ВБ    | - | Выносной блок;                                                  |
| ВСВ   | - | Всемирно скоординированное время;                               |
| ГГО   | - | Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова;           |
| ГКЛ   | - | Галактические космические лучи;                                 |
| ГМО   | - | Гидрометеорологическая обсерватория;                            |
| ГЭЦ   | - | Глобальная электрическая цепь;                                  |
| МЦД   | - | Мировой центр данных;                                           |
| ОГМС  | - | Объединенная гидрометеорологическая станция;                    |
| ПЧВ   | - | Павильон чистого воздуха;                                       |
| РД    | - | Руководящий документ;                                           |
| РИНЦ  | - | Российский индекс научного цитирования;                         |
| СИ    | - | Средство измерения;                                             |
| СКЛ   | - | Солнечные космические лучи;                                     |
| ФГБУ  | - | Федеральное государственное бюджетное учреждение;               |
| ЭДС   | - | Электродвижущая сила;                                           |
| ЭХА   | - | Электрические характеристики атмосферы;                         |

|                 |                                                                                                                                                  |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AFINSA          | - Atmospheric electric Field Network in South America<br>(Южно-Американская сеть мониторинга атмосферного электрического поля);                  |
| DMPS            | - Differential Mobility Particle Sizer (Дифференциальный измеритель концентрации аэрозольных частиц);                                            |
| $E$             | - Напряженность электрического поля атмосферы;                                                                                                   |
| GloCAEM         | - Global Coordination of Atmospheric Electricity Measurements<br>(Глобальная, скоординированная сеть мониторинга за атмосферным электричеством); |
| $N$             | - Концентрация аэрозольных частиц;                                                                                                               |
| NOAA            | - National Oceanic and Atmospheric Administration<br>(Национальное управление океанических и атмосферных исследований);                          |
| NSF             | - National Science Foundation (Национальный научный фонд)                                                                                        |
| $\lambda_+$     | - Электрическая проводимость воздуха, обусловленная положительными аэроионами;                                                                   |
| $\lambda_-$     | - Электрическая проводимость воздуха, обусловленная отрицательными аэроионами;                                                                   |
| $\Sigma\lambda$ | - Суммарная электрическая проводимость воздуха<br>$\Sigma\lambda = \lambda_+ + \lambda_-$ .                                                      |

## Введение

Электрические характеристики приземного слоя атмосферы, такие как напряженность электрического поля и электрическая проводимость воздуха, как одни из характеристик глобальной электрической цепи (ГЭЦ), могут испытывать изменения под воздействием циклических и других естественных процессов в атмосфере, а также при возникновении преднамеренных и непреднамеренных воздействий [1–4]. Помимо этого, электрическое состояние атмосферы может иметь большое влияние на работу радиосвязи. В свою очередь, молниевая активность принадлежит к числу наиболее опасных явлений для самолетов и различных наземных объектов. Опасность представляют как сами токи молний, так и их мощное электромагнитное излучение [5].

В рамках данной диссертационной работы рассматриваются теоретические модели глобальной электрической цепи в атмосфере, разработанные как отечественными [6–13], так и зарубежными [14–18] учеными. Для обоснования данных моделей приводятся результаты экспериментальных наблюдений на российских арктических станциях. Сформулированы также основные уравнения токовой цепи с учетом влияния слоев аэрозольных частиц в атмосфере, а также рассмотрено влияние различных скоростей ветра на суточную вариацию напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы.

Одним из экспериментальных результатов является кривая Карнеги, которая описывает унитарную суточную вариацию напряженности электрического поля (или градиента потенциала) в зависимости от всемирного скоординированного времени (ВСВ). Эта кривая не зависит от места расположения пункта наблюдения, и по современному представлению основной причиной ее возникновения является грозовая активность, действующая по всему земному шару [2]. Регулярные наблюдения на наземных станциях в высокоширотном регионе, как наиболее «чистом» и не подверженном антропогенному влиянию, позволяют отслеживать как глобальные тренды, так и локальные во времени и пространстве возмущения

и дать оценку фактического электрического состояния приземного слоя атмосферы в сравнении с ее предыдущим и прогнозируемым состоянием [19–22].

Актуальность проблемы исследования глобальной электрической цепи 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 [23]. 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:

- Построение 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 проводимости 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, а также в виде стендовых, устных и пленарных докладов на различных конференциях: Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» (Борок, 2015); V Всероссийская научная конференция

«Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (СПб, 2018); Молодежные научные чтения «Наука и техника, общество и культура: проблемы конвергентного развития» (Таганрог, 2018); VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству с международным участием (Нальчик, 2019); XI Международная конференция «Солнечно-Земные связи и физика предвестников землетрясений» (Паратунка 2020); VIII Международная научно-практическая конференция «Полярные чтения» (СПб, 2020); XXIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых САТЭП «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Борок, 2020); XV Международная Школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (Томск, 2022); IV Международная научная конференция «Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды» (Ставрополь, 2022); XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика» (Нижний Архыз, 2022); VII всероссийской научной конференции "Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды" (СПб, 2022); IX Всероссийская научная конференция по атмосферному электричеству (СПб, 2023); Восьмой Всероссийский объединенный метеорологический и гидрологический съезд (СПб, 2024).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 статей (9 издано, 1 находится в печати) 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 работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений и списка литературы. 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 (ГКЛ и СКЛ) 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. Получены уравнения для напряженности электрического поля с учетом коэффициента поглощения ионов, как величины связывающей концентрацию аэрозольных частиц и поглощаемых ими атмосферных ионов для двух областей столба атмосферы. Первая область — это область слоя аэрозоля, вторая – область, расположенная выше первой, которая свободна от аэрозоля.

Дальнейший раздел посвящен влиянию аэрозольных частиц на концентрацию аэроионов и, как следствие, на электрическую проводимость атмосферы в виде уравнения ионизационно-рекомбинационного баланса, а также определению коэффициента поглощения ионов ( $\eta$ ), полученного при решении

данного уравнения для различного типа ионов. Получены численные зависимости напряженности электрического поля от высоты верхней границы аэрозольного слоя для различных значений  $\eta$ .

В третьей 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. Приводится обоснование критериев фильтрации данных. Показано, что данные критерии почти полностью исключают попадание в выборку данных о напряженности электрического поля значений, полученных в период действия метелей различной градации.

Далее приведены сравнительные результаты, полученные при введении данных критериев, с данными, полученными в дни, когда отсутствовали метеоявления. Показано, что для обеих станций вечерний максимум унитарной вариации для отфильтрованных данных более пологий нежели у значений при отсутствии явлений, но, в целом, результаты показывают достаточную повторяемость рядов.

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.

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 сформулированы основные выводы по итогу данной работы. Объем работы составил 124 страницы, в том числе 76 формул, 26 рисунков, 14 таблиц. Список цитируемой литературы включает 110 источников.

# 1. Современное состояние теоретических и экспериментальных исследований глобальной электрической цепи

## 1.1. Возникновение термина глобальная электрическая цепь

Глобальная электрическая цепь — наименование, введенное в 1979 году [14,15], которое подразумевает под собой систему электрических токов, возникающих в атмосфере, текущих от поверхности земли и океанов, которые пронизывают ионосферу, а также магнитосферу [23]. Предпосылками для введения этого понятия являлись результаты экспедиций, проводимых еще в 20-х годах XX века на исследовательском судне Карнеги, включающими в себя измерение градиента потенциала в различных областях Мирового океана. Одной из важнейших заслуг данных исследований, несомненно, принято считать открытие так называемой «унитарной вариации», также называемой кривой Карнеги [2].

Унитарная вариация представляет собой суточный ход напряженности электрического поля атмосферы ( $E$ ), значение которого во всех областях составляло порядка  $10^2$  В/м, в виде полуволны с локальным минимумом в 3 часа и максимумом около 19 часов всемирного скоординированного времени. При этом условиями для проявления данной кривой являются так называемые дни «хорошей погоды», которые обусловлены отсутствием облачности нижнего яруса, общая облачность не превышает 5 баллов, отсутствуют метеорологические явления, а скорость ветра составляет менее 6 м/с. Данная полуволна наблюдалась во всех районах Мирового океана, в которых проводились исследования.

Стоит учесть, что данная вариация достаточно трудно восстанавливаема при наблюдениях в средних и низких широтах на материках. Для данных мест характерный суточный ход имеет дополнительный максимум, проявляющийся с меньшей амплитудой в полдень локального времени. Данный максимум является следствием турбулентного электродного эффекта [24].

## 1.2. Теоретические исследования ГЭЦ

Учитывая тот факт, что атмосферный воздух является электропроводящей средой, электрическое поле в атмосфере в отсутствии сторонних генераторов должно было бы исчезнуть в течение 10 минут, чего фактически не происходит [25]. Общепринятая на данный момент концепция заключается в том, что основными токовыми генераторами являются грозы, протекающие по всем земному шару, наибольший вклад из которых дают грозы в экваториальном регионе. Данная гипотеза нашла свое подтверждение в сопоставлении кривой Карнеги с осредненной суточной вариацией количества гроз по всему земному шару, которая, как оказалось, также имеет максимум около 19-20 часов и минимум около 3-4 часов ВСВ.

Первые работы по моделированию глобальной электрической цепи были выполнены еще в 20-х годах XX века. Одной из них стала модель Вильсона, заключавшаяся в том, что Земной шар представлялся в виде сферического конденсатора, обкладками которого являются проводящая поверхность Земли, на которой сосредоточен отрицательный заряд и положительно заряженный слой верхней атмосферы, соответственно. Данные заряды, по мнению Вильсона, создают некую разность потенциалов и, как следствие, у поверхности Земли наблюдается электрическое поле [24].

В конце 70-х годов XX века вместе с введением термина «глобальная электрическая цепь» была разработана значительно более сложная с точки зрения физико-математической реализации квазистационарная модель [14–16], получившая свое название в честь авторов (модель Робла-Хейса). В первой из этих работ исследованы электрические связи между земной поверхностью и нижней атмосферой. Рассмотрены конвективные облака, как дипольные электрические генераторы с положительным зарядом в верхней части облака и отрицательным в нижней. Также проведены расчеты потенциала с учетом орографических особенностей земной поверхности.

Так в работе [26] рассматривается теоретическое влияние грозových генераторов на электрические процессы в атмосфере при нестационарном сценарии развития. В работе [27] рассматривается вклад небольших (по масштабам охватываемого пространства) конвективных систем ГЭЦ.

В работе [28] была построена классическая модель глобальной атмосферно-электрической токовой цепи с учетом особенностей рельефа земной поверхности. Земная поверхность была разбита на криволинейные квадраты с длиной стороны  $5^\circ$  широты на  $5^\circ$  долготы. С учетом этого было рассмотрено глобальное распределение грозových генераторов. Было рассчитано глобальное сопротивление путем суммирования отдельно взятых сопротивлений столбов атмосферы в данных криволинейных квадратах. Помимо этого, был рассчитан ток, текущий от грозových генераторов в верхние слои атмосферы в 5-градусной сетке, а также потенциал ионосферы. При этом влияние горизонтальных составляющих электрического поля предполагалось малым.

Помимо генераторов нижней атмосферы существенный вклад в создание суточных вариаций  $E$  дают источники в верхней атмосфере, так называемые магнитосферный и ионосферный генераторы [29, 30]. Первый из них возникает за счет взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли, создавая горизонтальную разность потенциалов 40-100 кВ, второй — ионосферное динамо, которое возникает за счет солнечных и лунных приливов с горизонтальной разностью потенциалов между экватором и полюсами 5-15 кВ [23].

В работах [31–33] рассматривается модель планетарного токового генератора с учетом супервращения ионосферы Земли. Найдено решение задачи, позволяющее оценить влияние данного супервращения на электрические поля и токи в атмосфере. В работе [34] на основе нестационарной модели для потенциала электрического поля вычисляются временные вариации напряженности электрического поля и плотности тока в нижних слоях атмосферы, создаваемые ионосферным потенциалом. Сделан вывод о существовании сдвига фаз между ионосферным потенциалом и плотностью тока в местах его измерения.

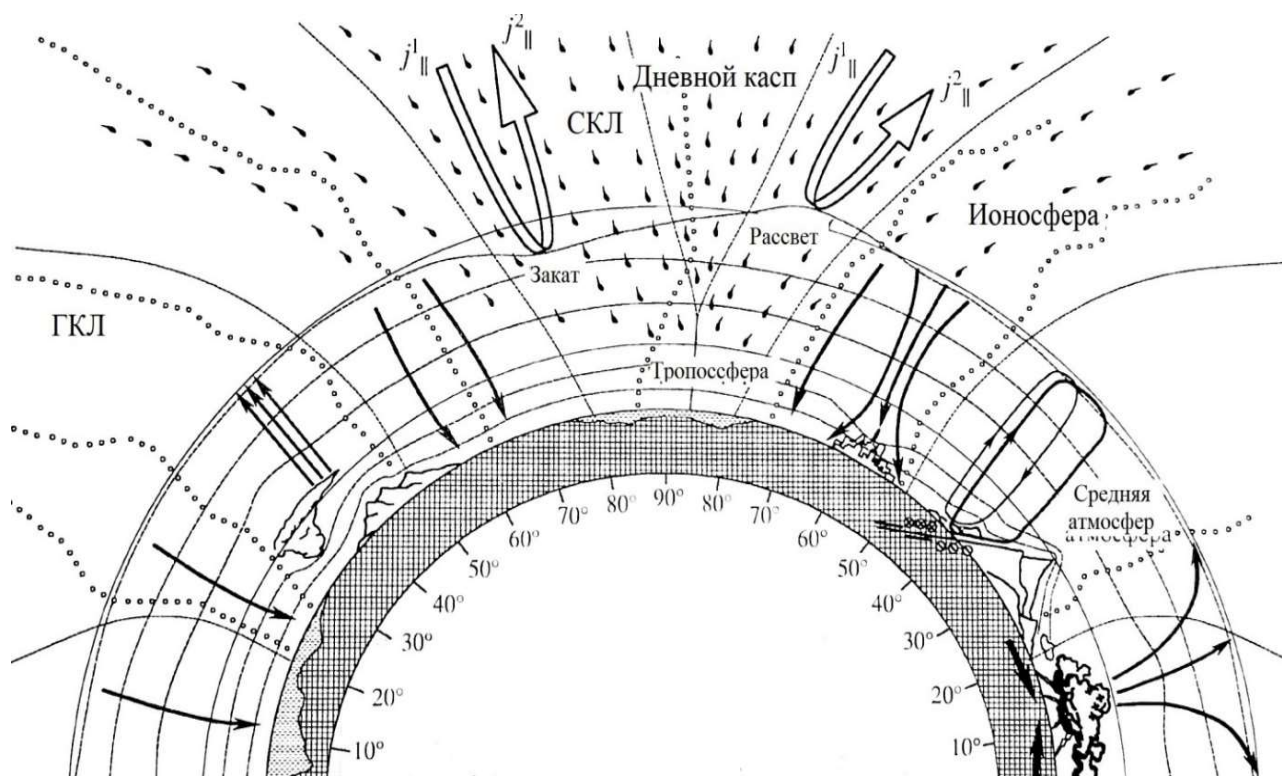


Рисунок 1.1 – Схематическая модель глобальной электрической цепи в атмосфере [20]

В работах [35, 36] проводят экспериментальный анализ влияния отклика динамики солнечной активности, как основного фактора, поддерживающего магнитосферное динамо, на атмосферное электрическое поле вблизи земной поверхности. Авторами установлена взаимосвязь между вариациями напряженности электрического поля на различных станциях наблюдения и индексом солнечной активности, которые наиболее выражены в периоды вспышек на Солнце.

Перечисленные источники электрических токов в атмосфере являются элементами глобальной электрической цепи, представляющими земной шар, как гигантский шаровой конденсатор, обкладками которого являются проводящие слои ионосферы, поверхность земли и океанов [37]. Учитывая все вышесказанное, можно сделать вывод, что ГЭЦ создается совокупностью различного рода геофизических процессов, которые являются источниками электродвижущей силы. На рисунке 1.1 представлена визуальная модель ГЭЦ [38]. Стоит отметить, что в областях, где присутствуют грозовые облака вверх текут токи, заряжающие

атмосферу, а в областях, где отсутствуют грозовые облака, вниз текут токи разрядки [24].

Помимо генераторов ЭДС на атмосферу воздействуют галактические и солнечные космические лучи (ГКЛ и СКЛ), которые являются основными источниками, обеспечивающими электрическую проводимость атмосферы в верхних слоях. Также стоит отметить, что отдельная роль в обеспечении функционирования ГЭЦ отводится областям высоких широт, для которых характерна повышенная активность ионосферно-магнитосферных источников [38].

В следующей работе [15] авторами модели ГЭЦ рассматривался вопрос взаимосвязи верхней и нижней атмосферы. В частности, вопрос о влиянии электрических полей, присутствующих в ионосфере, на приземные слои. В обоих случаях решение поставленных задач было получено в сферической системе координат.

Обе эти работы авторов послужили толчком для дальнейшего развития данной модели. Таким образом, в работе [6] была рассмотрена модель Робла-Хейса с учетом конвективного электрического генератора. Авторами были проведены оценки вклада данного генератора в средний потенциал ионосферы, который составил примерно 10%, а при условии роста площади пограничного слоя с неустойчивой конвекцией, этот вклад может достигать 43%.

В работе [39] авторы, применяя численную модель прогноза погоды WRF-ARW, построили сезонную динамику суточных колебаний ионосферного потенциала. Показано, что в периоды декабрь-февраль наблюдаются пониженные значения потенциала, а в противоположные – повышенные. При этом суточные вариации повторяют кривую Карнеги.

Основные современные вопросы и проблемы, связанные с изучением ГЭЦ изложены в работах [29, 40]

### 1.3. Электродный слой в атмосфере

Помимо изучения электрических процессов, протекающих в верхних слоях атмосферы, важную роль уделяют изучению такого феномена, как электродный эффект. Данный эффект несет важную роль, поскольку он определяет электрическую структуру нижней атмосферы вблизи поверхности Земли, называемым электродным слоем. Под электродным эффектом принято принимать процесс образования объемных зарядов в приземном слое атмосферы в следствии того, что в данном слое в основном существует только ток проводимости, обусловленный положительными аэроионами, текущими вверх, тогда как ток проводимости, вызванный отрицательными аэроионами, практически отсутствует [23, 24, 41].

В зависимости от метеорологической обстановки принято рассматривать два варианта электродного эффекта [24, 42]. Классический электродный эффект возникает при отсутствии турбулентного перемешивания и устойчивой стратификации в электродном слое [43]. Турбулентный электродный эффект, как следствие, возникает при появлении турбулентного перемешивания. При классическом сценарии предполагается, что перенос аэроионов происходит только под действием электрических сил, тогда как при турбулентном в перенос вносят вклад и потоки воздуха, при этом этот вклад может быть более существенным нежели электрический [44].

В вышеуказанных работах электрические процессы в электродном слое в основном рассматриваются в условиях «хорошей погоды». На электродный эффект могут оказывать сильное влияние наличие аэрозольных частиц в атмосфере, которые могут осаждают на себе аэроионы, образуя тем самым тяжелые ионы. Данные ионы, в свою очередь, в итоге могут определять электрическое состояние электродного слоя [42]. Помимо аэрозолей на состояние электродного слоя сильное влияние оказывает наличие объемного заряда.

Так в работах [45, 46] рассматривается теоретическое и практическое влияние мощной конвективной облачности на распределение объемного заряда и

концентрации легких ионов в электродном слое. Авторами показано, что в условиях развития конвективных явлений в атмосфере действует как турбулентный перенос аэроионов, так и вызванный электрическими силами, причем последние играют решающую роль. Теми же авторами был рассмотрен теоретический вопрос о влиянии аэрозольных частиц на электродный слой при их наличии, где данные частицы являются основным стоком для аэроионов. Получены аналитические решения для моделей электродного эффекта в стационарном и нестационарном видах [47].

Помимо вышесказанного ряд экспериментальных работ, посвящен влиянию прохождения кучево-дождевой облачности на вариации приземного электрического поля [48], а также спектрального анализа данных вариаций [49]. Вместе с тем, существует ряд экспериментальных работ, связывающих электрические процессы в электродном слое с различными метеорологическими явлениями и параметрами. В работе [50] дается анализ динамики изменений  $E$  в период выпадения ливневых осадков.

В работах [51, 52] рассматриваются связи между оптическими и электрическими характеристиками атмосферы в условиях морозов. В первой из данных работ показано, что в результате заряжения мелкодисперсного аэрозоля происходит увеличение значений  $E$ . Во второй работе наоборот, выдвинуто предположение, что в результате сильного падения температуры воздуха и изменении агрегатного состояния частиц тумана происходит заметное снижение напряженности электрического поля и рост электрической проводимости воздуха.

В работе [53] приводятся статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на напряженность электрического поля. Примечательно то, что в данной работе анализируется объем данных за более чем 40-летний период непрерывных наблюдений на станции Воейково. Полученные результаты выявили метеоявления, оказывающие наибольшее влияние на отклонение  $E$  от значений, характерных для отсутствия данных явлений.



#### 1.4. Экспериментальные исследования ГЭЦ

Помимо различных регионов Мирового океана, было установлено, что унитарная вариация хорошо прослеживается в горных и полярных регионах. В последние несколько десятилетий интерес к изучению данного явления неуклонно растет. Все больше исследователей проводят независимые изыскания во всевозможных регионах и при различных условиях наблюдений.

Рядом авторов проведены наблюдения и выявлены статистические оценки зависимости суточных и сезонных распределений  $E$  на отличных друг от друга высотах в разных горных областях. Таким образом, например, в Восточных Саянах на высотах 2000 и 3000 м (станции Часовые сопки и Хулугайша, соответственно) показано проявление унитарной вариации в зимний период года. При этом отмечено, что в летние месяцы суточный ход  $E$  аналогичен тому, который наблюдается на наземных внутриконтинентальных станциях [54].

Подобные наблюдения также проводились на Северном Кавказе в предгорной (станции Нальчик, Кызбурун) и горной (пики Чегет и Терскоп) зонах, авторами были сделаны выводы, соответствующие наблюдениям в Восточных Саянах [55, 56]. При этом, по итогу анализа, данные были разделены по 5 группам, условно соответствующим различным метеорологическим обстановкам (хорошая погода, облачность 2-3 балла, сплошная облачность, дни с осадками, дни с грозами). Суточный ход  $E$  повторял кривую Карнеги в дни, попадающие в первые две группы.

Также стоит отметить исследования  $E$  в дни хорошей погоды на высокогорной станции в Тянь-Шане, проводимые в период с 2007 по 2012 год [57]. Главной особенностью этих исследований является тот факт, что за весь период наблюдений унитарная вариация не обнаружена ни на одной реализации эксперимента независимо от сезона. Авторы работы объясняют это явление тем, что наблюдения проводились в глубине материка в сейсмоопасных зонах.

Помимо высокогорных исследований, наблюдения за  $E$  долгое время проводятся в Антарктиде на станциях Мирный [58] и Восток [59]. Данные

наблюдения до 90-х годов XX века проводились при методическом руководстве Главной геофизической обсерватории. В последующие годы по настоящее время проведением наблюдений и анализом получаемой информации занимаются специалисты института Арктики и Антарктики и только на станции Восток. Так, например, в работе [60] рассматривался вопрос о восстановлении реальных значений электрического поля, приравненного к равнинной местности, а в работе [61] представлены результаты наблюдений за  $E$  в 1998 году. Авторами показано, что  $E$  имеет сильную сезонную зависимость, при этом суточный ход повторяет кривую Карнеги. Также были проведены модельные расчеты колебаний  $E$ , связанные с продольными токами в магнитосфере, которые хорошо согласуются с полученными данными [62]. Помимо этого, были проанализированы данные  $E$  со станции Восток и высокоширотной обсерватории Хорзунд (архипелаг Шпицберген) [63]. В работе показано, что на станции в Антарктиде вариации  $E$  имеют ярко выраженную связь (коэффициент корреляции  $R \sim 0,7-0,9$ ) с вариациями потенциала ионосферы, при этом в Арктике данная связь очень сильно зависела от положения электроджета, в одних случаях могла хорошо прослеживаться ( $R \sim 0,7-0,85$ ), в других иметь отрицательную зависимость ( $R \sim -0,7 \dots -0,9$ ).

Стоит отметить и наблюдения  $E$  в свободной атмосфере. Начиная с конца 50-х годов XX века проводилась многолетняя серия самолетных высотных наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы в полярных регионах СССР на самолете-лаборатории Ил-14. Вдоль побережья Северного Ледовитого океана, в основном по маршруту Архангельск-Амдерма-Диксон, проводились горизонтальные зондировки на высоте 3 км, а также вертикальные до высоты 6 км. Были получены данные о высотном распределении  $E$ , а также построен ее суточный ход, который хорошо согласуется с кривой Карнеги [19,20,64]. Полученные за период этих зондировок данные являются уникальными и по сей день.

Помимо исследований ГЭЦ в условиях «хорошей погоды», также проводились исследования суточных вариаций  $E$  в приземном слое при наличии

задымленности от лесных пожаров в Сибири [65,66]. Показано, что суточные вариации  $E$  в этих условиях имеют отличный от классической кривой Карнеги вид. При этом вариации могут составлять от -300 В/м ночью до 300 В/м в дневное время.

Почти все перечисленные экспериментальные исследования подтверждают наличие глобальной унитарной вариации напряженности электрического поля атмосферы в условиях «хорошей погоды», но являются достаточно сложными в своей реализации. На это влияет ряд факторов, главным из которых является труднодоступность большинства станций, приведенных выше, а также высокие финансовые затраты для формирования подобных экспедиций, в особенности самолетных исследований. В связи с этим большинство наблюдений проводятся при научно-исследовательских организациях или же на постоянно действующих станциях наблюдения за различными геофизическими параметрами.

### 1.5. Сетевые наблюдения за электрическими характеристиками атмосферы

Так, начиная с 60-х годов XX века в рамках Международного геофизического года на территории СССР начала развиваться сеть станций наблюдения за электрическими характеристиками атмосферы, входящая в ведомство Госкомгидромета. Позднее наблюдения начались и в других странах, получив статус мировой сети. Программа наблюдений включала в себя регистрацию таких параметров, как напряженность электрического поля и полярных электрических проводимостей воздуха, обусловленных положительными ( $\lambda_+$ ) и отрицательными ( $\lambda_-$ ) аэроионами. Количество станций международной сети было разным в различные годы и достигало порядка 40 пунктов наблюдения, расположенных на территориях СССР, Европы, а также Северной Америки.

Мировым центром данных (МЦД) по сбору информации с сети станций являлась Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. Список всех станций, измеряемые параметры и годы предоставления данных в МЦД представлены в таблице 1.1. Рядом авторов опубликованы работы, включающие

анализ информации, полученной с данной сети [21,64,67]. Показаны характерные для глобальной унитарной вариации закономерности. Карта сети станций СССР наряду с современной ее преемницей изображена на рисунке 1.4.

Таблица 1.1

Список станций в различные периоды предоставлявшие результаты наблюдения за ЭХА в МЦД

| №  | Страна         | Станция         | Годы работы | Измеряемые параметры |             |             |
|----|----------------|-----------------|-------------|----------------------|-------------|-------------|
|    |                |                 |             | $E$                  | $\lambda_+$ | $\lambda_-$ |
| 1  | СССР (СНГ)     | Елань           | 1965-68     | +                    | +           | +           |
| 2  |                | Верхнее Дуброво | 1964-н.в.   | +                    | +           | +           |
| 3  |                | Душети          | 1964-89     | +                    | +           | +           |
| 4  |                | Иркутск         | 1965-н.в.   | +                    | +           | +           |
| 5  |                | Кара-Даг        | 1988-89     | +                    | +           | +           |
| 6  |                | Киев            | 1964-68     | +                    | -           | -           |
| 7  |                | Киров           | 1974-78     | +                    | -           | -           |
| 8  |                | Мурманск        | 1964-70     | +                    | -           | -           |
| 9  |                | Одесса          | 1964-94     | +                    | +           | +           |
| 10 |                | Южно-Сахалинск  | 1968-н.в.   | +                    | +           | +           |
| 11 |                | Ташкент         | 1964-95     | +                    | -           | -           |
| 12 |                | Воейково        | 1964-н.в.   | +                    | +           | +           |
| 13 | Португалия     | Лиссабон        | 1964-90     | +                    | -           | -           |
| 14 |                | Порто           | 1968-77     | +                    | -           | -           |
| 15 | Великобритания | Лервик          | 1964-83     | +                    | -           | -           |
| 16 |                | Эскдалемюр      | 1964-81     | +                    | -           | -           |
| 17 |                | Кью             | 1964-79     | +                    | -           | -           |
| 18 | Новая Зеландия | Окленд          | 1964-69     | +                    | -           | -           |
| 19 | Венгрия        | Будапешт        | 1964-68     | +                    | -           | -           |

|    |           |             |         |   |   |   |
|----|-----------|-------------|---------|---|---|---|
| 20 | ГДР       | Потсдам     | 1964-67 | + | - | - |
| 21 | Канада    | Монреаль    | 1964-69 | + | - | - |
| 22 | ФРГ       | Аахен       | 1964-67 | + | + | + |
| 23 | Бельгия   | Дурбес      | 1964-80 | + | + | + |
| 24 |           | Уккль       | 1964-80 | + | - | - |
| 25 | Япония    | Какиока     | 1964    | + | - | - |
| 26 |           | Мемамбецу   | 1964    | + | - | - |
| 27 |           | Сакусима    | 1972-87 | + | - | - |
| 28 | США       | Соккоро     | 1965    | + | - | - |
| 29 |           | Универ.парк | 1965    | + | - | - |
| 30 |           | Нивот Ридж  | 1966-68 | + | + | + |
| 31 | Италия    | Венеция     | 1966-68 | + | - | - |
| 32 |           | Мачерата    | 1976-87 | + | + | + |
| 33 | Польша    | Свидер      | 1969-90 | + | + | + |
| 34 | Канада    | Торонто     | 1970-71 | + | + | + |
| 35 | Греция    | Афины       | 1970-78 | + | + | + |
| 36 | Франция   | Брест       | 1973    | + | - | - |
| 37 | Финляндия | Хельсинки   | 1979-89 | + | + | + |
| 38 | Швейцария | Аарау       | 1992    | + | - | - |

Постоянные наблюдения за  $E$  производятся в геофизической обсерватории «Борок» [68, 69]. На данной станции проявляется ярко выраженная особенность суточного хода  $E$ , характерного для средних широт внутри континентов, помимо глобальных изменчивостей данные регионы имеют и локальный ход напряженности электрического поля. Унитарная вариация в подобных условиях имеет дополнительный максимум локального полдня [38, 68, 70, 71].

В работе [72] представлены результаты параллельных наблюдений за  $E$  на трех регионально разнесенных станциях, расстояния между которыми составляют от 100 до 370 км (станции Борок, Прозорово и Городец). Авторами отмечено, что

по результатам кросскорреляционного анализа данных в период магнитных бурь существует наличие внешнего источника, воздействующего на  $E$  в районе наблюдений.

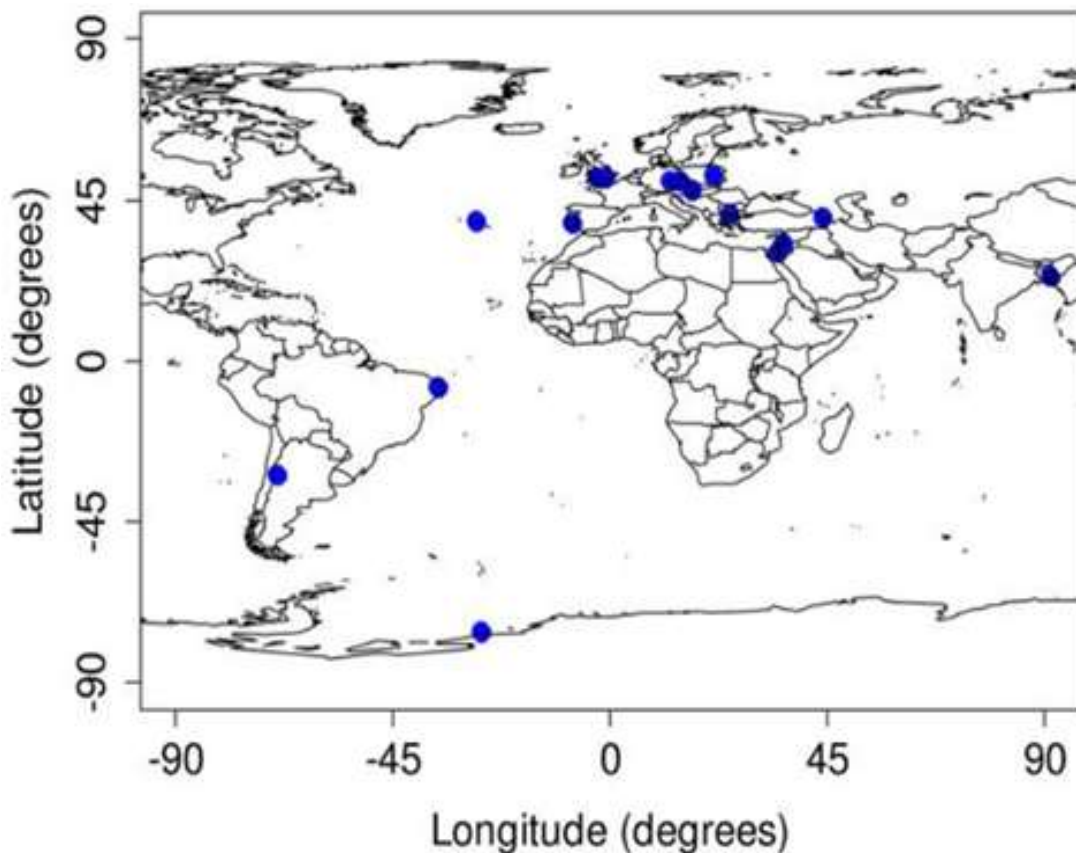


Рисунок 1.2 - Глобальная сеть мониторинга атмосферного электричества (GloCAEM) [34]

В настоящее время в рамках проекта GloCAEM (Global Coordination of Atmospheric Electricity Measurements) создана глобальная сеть мониторинга атмосферного электричества, которая насчитывает 17 станций наблюдения за  $E$  по всему земному шару (рисунок 1.2). Целью создания данной сети являлось всестороннее изучение основных воздействий на ГЭЦ, таких как климатические изменения, влияние космической погоды. Помимо глобальных процессов, отдельным интересом представляется изучение локальных процессов, влияющих на  $E$ , таких как электризация облаков, молнии, зарядение пыли и атмосферных аэрозолей [73]. Авторами выделено две основные станции для изучения ГЭЦ: Грасиоза (Азорские острова, Португалия) и Халли (побережье Антарктиды).

Данный выбор сделан по причине наиболее выраженного проявления унитарной вариации.

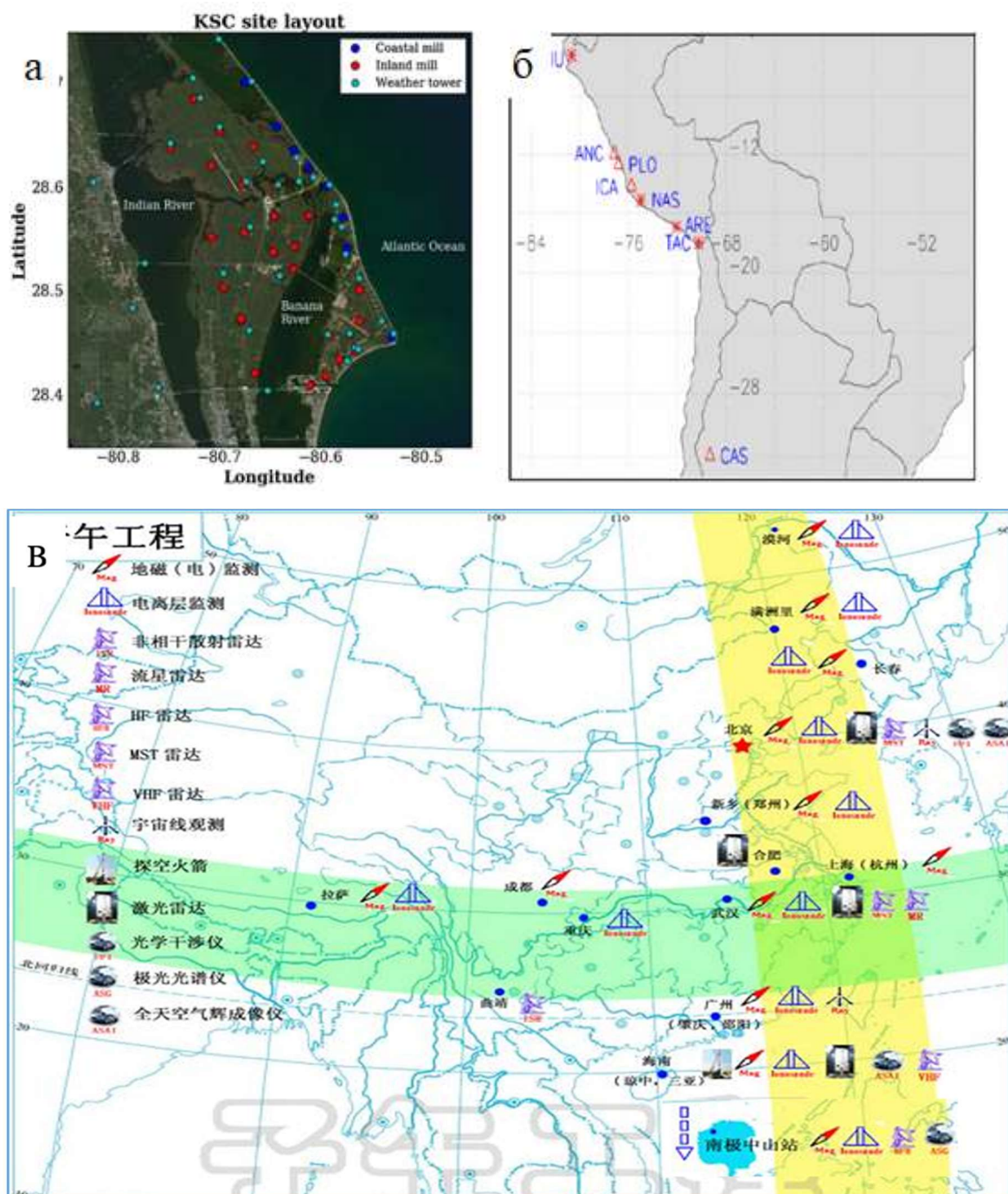


Рисунок 1.3 – Карты существующих сетей наблюдений за приземным атмосферным электричеством: а – космический центр им. Кеннеди (NASA) [35]; б – Южноамериканская (AFINSA) [36]; г – Китайская (Meridian Project) [37]

Помимо глобальной сети мониторинга существуют также региональные сети наблюдения за  $E$ . Так, например, уже более чем 20 лет успешно функционирует сеть при Космическом центре им. Кеннеди НАСА в штате Флорида. Данная сеть состоит из 30 датчиков для измерения  $E$ , расположенных на сравнительно небольшой прямоугольной площади со сторонами приблизительно 50х30 км (рисунок 1.3а). Анализ временных рядов данных этой сети выявил глобально генерируемую суточную сигнатуру при довольно слабой годовой изменчивости [74].

Относительно недавно начала свою работу сеть наблюдения за электрическим полем атмосферы в Южной Америке (AFINSA). Сеть состоит из 8-ми пунктов наблюдения, расположенных вдоль побережья Тихого океана (рисунок 1.3б). Основная цель данной сети – получить характерную суточную кривую атмосферного электрического поля всемирного времени в хорошую погоду. Также авторы намерены изучить влияние на атмосферно-электрическое поле различных солнечных, космических и геофизических явлений, чтобы лучше понять влияние данных процессов на ГЭЦ [75].

В 2013 году начал работу китайский проект «Meridian» состоящий из нескольких станций вдоль 120° восточной долготы для мониторинга космической среды, начиная с Мохэ, самой северной станции Китая, через Пекин, Ухань и до станции Чжуншань в Антарктике (рисунок 1.3г). Данный проект был основан в первую очередь для понимания физических процессов космической погоды и ее точного прогнозирования. Проект «Меридиан» состоит из 15 наблюдательных станций, инструменты помимо флюксметра включают магнитометр, ионозонд, радар некогерентного рассеяния, ВЧ-радар обратного рассеяния, ОНЧ-приемник, лидар и интерферометр Фабри-Перо (ИФП) [76].

В последнее десятилетие на базе сети, которая функционировала в СССР, с целью расширения, автоматизации и модернизации, была создана сеть мониторинга за атмосферным электричеством Росгидромета. Данная сеть является единственным непрерывно действующим источником информации об электрическом состоянии невозмущенной атмосферы над территорией



Российской Федерации и включает в себя 10 пунктов мониторинга электрического состояния атмосферы (рисунок 1.4), 4 из которых (Воейково, Верхнее Дуброво, Иркутск и Южно-Сахалинск) имеют довольно длительные (более 50 лет) ряды среднечасовых значений. Также в сеть входят 3 пункта (Тикси, Диксон и мыс Баранова) расположенные в уникальном для данного вида наблюдений регионе, а именно, в высокоширотной зоне на берегу Северного Ледовитого океана [77–80].



Рисунок 1.4 – Советская и российская сети станций наблюдения за электрическими характеристиками атмосферы [30]

## Выводы к главе 1

Принимая во внимание тот факт, что исследования электрических процессов, протекающих в атмосфере, берут свое начало в XVIII веке, а изучением природы унитарной вариации, в частности, занимаются уже порядка 100 лет, проведенный обзор работ, показывает большую заинтересованность проблематикой данного направления и по сей день.

Основные направления исследований электрических характеристик приземного слоя атмосферы, как теоретические, так и экспериментальные в настоящее время сфокусированы на особенностях воздействия различных факторов на данные характеристики. Большое количество работ посвящены влиянию облачности, аэрозольного загрязнения, а также радиоактивности. Помимо прочего, в последние годы все чаще в работах различных авторов как отечественных, так и зарубежных стал подниматься вопрос о связи ЭХА с климатом земного шара.

Для исследования всех перечисленных процессов несомненно необходимы длительные и достоверные ряды наблюдений, которые могут обеспечить достаточную репрезентативность данных. Основным выводом к данной главе является то, что на данный момент не исследовались долгосрочные, непрерывные ряды на совокупности станций, расположенных в достаточном отдалении от районов с повышенной антропогенной нагрузкой. Таковыми несомненно являются станции, находящиеся в высокоширотной зоне на побережье Северного Ледовитого океана.

## 2. Физико-математическое моделирование глобальной электрической цепи

### 2.1. Основные уравнения, используемые при моделировании ГЭЦ

При математическом моделировании всех геофизических процессов, формирующих глобальную электрическую цепь, за основу полагают уравнения Максвелла:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{E} = \frac{-1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} (\vec{J}_o + \vec{J}_s) + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho \\ \vec{H} = 0 \\ \vec{J}_o = \lambda \vec{E} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

где  $\vec{E}, \vec{H}$  — напряженности электрического и магнитного полей;

$\vec{J}_o, \vec{J}_s$  — плотности омического и стороннего электрических токов;

$\lambda$  — электрическая проводимость воздуха;

$\rho$  — плотность электрического заряда;

$c$  — скорость света.

Если рассмотреть данные уравнения в стационарном виде, при котором магнитная индукция не меняется с течением времени, а также в обе части второго уравнения подставить оператор дивергенции, получив при этом уравнение сохранения плотности электрического заряда, то система примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{E} = 0 \\ \operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho \\ \operatorname{div}(\vec{J}_o + \vec{J}_s) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Данная система может быть использована при моделировании широкого класса задач атмосферного электричества, поскольку ею можно описать практически все процессы, протекающие в нижней атмосфере за исключением быстропеременных, таких как молниевые разряды, спрайты, джеты и т. д.

Полную плотность тока можно выразить следующим уравнением [8]:

$$\vec{j} = \vec{j}_o + \vec{j}_s = \lambda \vec{E} + \rho \vec{v} + D_T \nabla \rho + \sum_i \vec{j}_i \lambda \vec{E} \quad (2.3)$$

где  $v$  – гидродинамическая скорость среды;

$D_T$  – коэффициент турбулентной диффузии;

$j_i$  – плотность тока, создаваемая  $i$ -м источником.

В уравнении для сторонних токов, последний член суммирует все источники тока, которыми, в том числе, являются грозы. Первый и второй члены данного уравнения вносят существенный вклад в приземном слое, проявляясь за счет турбулентного перемешивания.

При условии  $T \gg \tau_\lambda$ , где  $T$  – характерный временной масштаб электрических процессов,  $\tau_\lambda$  – время электрической релаксации, система уравнений (2.2) принимает стационарный вид ( $1/\partial t = 0$ ):

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{E} = 0 \\ \text{div}(\vec{j} + \vec{j}_s) = 0 \\ \text{div} \vec{E} = 4\pi\rho \end{cases} \quad (2.4)$$

Поскольку электрическое поле потенциально, то можно ввести потенциал электрического поля  $\varphi$ , который связан с напряженностью электрического поля соотношением:

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi = -\nabla \varphi \quad (2.5)$$

Используя это соотношение, получим соответствующие уравнения для определения потенциала электрического поля в нестационарном и стационарном случаях:

$$\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \varphi + \text{div}(\lambda \nabla \varphi) = \sum_{s=1}^N \text{div} \vec{j}_s \quad (2.6)$$

$$\text{div}(\lambda \nabla \varphi) = \sum_{s=1}^N \text{div} \vec{j}_s \quad (2.7)$$

Здесь в правых частях уравнений записаны выражения учитывающие суммарное действие грозových генераторов. Уравнения (2.6) и (2.7) вместе с соответствующими начальными и граничными условиями являются основными

уравнениями, используемыми при моделировании глобальной электрической цепи. В частности, для стационарной (квазистационарной) задачи используются следующие граничные условия:

$$\begin{cases} \varphi|_{r=R} = 0 \\ \varphi|_{r=R+H} = \varphi_{\infty} \end{cases} \quad (2.8)$$

где:  $R$  — радиус Земли;

$R+H$  — радиус ионосферы;

$\varphi_{\infty}$  - потенциал ионосферы.

Обычно при модельных расчетах предполагается, что электрическая проводимость представляется выражением [25]:

$$\lambda(r) = \lambda_0 e^{\alpha(r-R)} \quad (2.9)$$

где  $\alpha = (0,2 - 0,3) \text{ км}^{-1}$ .

Основными параметрами, определяющими глобальное электрическое состояние являются потенциал ионосферы  $\varphi_{\infty}$ , определяемый балансом электрических токов зарядки от грозовых облаков и токов разрядки, текущих в областях «хорошей погоды». Его величина составляет 250-300 кВ. Другим параметром является общее сопротивление атмосферы  $\hat{R}$ , определяемое выражением:

$$\hat{R} = \frac{1}{4\pi R^2} \int_R^{R+H} \frac{dr}{\lambda(r)} \quad (2.10)$$

Его величина составляет 230 Ом, полный электрический ток в атмосфере 1000 А. Число гроз, действующих в данный момент времени по всему земному шару равно 2000 [25]. Кроме того глобальную электрическую цепь можно характеризовать некоторой емкостью  $C$ , равной 2.9 Ф и временной постоянной  $\tau = RC = 10$  мин, которая определяет время разрядки глобальной цепи в отсутствии генераторов.

## 2.2. Электрическая проводимость атмосферы

Помимо вышесказанного, довольно важную роль при изучении электрических свойств атмосферы имеет ее электрическая проводимость ( $\lambda$ ),

обусловленная концентрацией положительных ( $n_+$ ) и отрицательных ( $n_-$ ) аэроионов. За счет того, что ионный состав атмосферы, особенно в приземном слое, достаточно многообразен, существует большое количество, несущих в себе элементарный заряд (заряд электрона  $e$ ). Помимо этого, аэроионы различаются молекулярным составом, коэффициентом диффузии, размером и подвижностью ( $b_{\pm}$ ). Различают несколько групп ионов в зависимости от их радиусов ( $r$ ) и подвижностей. В таблице 2.1 представлены пять различных групп [1].

Таблица 2.1

Распределение ионов по подвижностям и радиусам.

| Наименование группы                  | $b_{\pm}$ , $\text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$ | $r$ , см                                    |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Легкие (малые) ионы                  | $\geq 10^{-4}$                                     | $\leq 6,6 \cdot 10^{-8}$                    |
| Легкие промежуточные ионы            | $10^{-6} \dots 10^{-4}$                            | $6,6 \cdot 10^{-8} \dots 8 \cdot 10^{-8}$   |
| Тяжелые (большие) промежуточные ионы | $10^{-7} \dots 10^{-6}$                            | $8 \cdot 10^{-8} \dots 2,5 \cdot 10^{-6}$   |
| Ионы Ланжевена                       | $2,5 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-7}$                  | $2,5 \cdot 10^{-6} \dots 5,7 \cdot 10^{-6}$ |
| Ультратяжелые ионы                   | $< 2,5 \cdot 10^{-8}$                              | $> 5,7 \cdot 10^{-6}$                       |

Электрическая проводимость воздуха, при известном ионном составе, определяется следующим уравнением:

$$\lambda = \sum_i (e_{i+} b_{i+} n_{i+} + e_{i-} b_{i-} n_{i-}) = \lambda_+ + \lambda_- \quad (2.11)$$

где  $i$  – суммирование по группам ионов;

$\lambda_+$ ,  $\lambda_-$  – полярные электрические проводимости воздуха.

В настоящее время принято считать, что основной вклад в ионизацию приземного слоя вносят радиоактивное излучение земной поверхности, эманация почвенных радиоактивных газов таких, как радон и продуктов его полураспада, а также, в наименьшей мере, космическое излучение. С ростом высоты влияние приземных ионизирующих факторов уменьшается, и увеличивается влияние

космических лучей, что, в свою очередь вызывает рост  $\lambda$ . Зависимость  $\lambda$  от высоты может быть представлена следующим выражением [2]:

$$\lambda = \lambda_0 \exp \alpha(r - r_0) \quad (2.12)$$

где  $r_0$  – радиус Земли;

$$\alpha^{-1} = 6,4 \text{ км.}$$

Помимо данного уравнения, до высоты в 40 км  $\lambda$  также может определяться более уточненными эмпирическими формулами [81]:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 \exp\left(\frac{r - r_0}{0,82}\right), & 0 < r - r_0 < 3,6 \text{ км,} \\ \lambda_1 \exp\left(\frac{r - r_0}{4,1}\right), & 3,6 < r - r_0 < 17,7 \text{ км,} \\ \lambda_2 \exp\left(\frac{r - r_0}{7,1}\right), & 17,7 < r - r_0 < 40 \text{ км,} \end{cases} \quad (2.13)$$

где  $\lambda_0$  – электропроводность у поверхности Земли;  $\lambda_1 = \lambda(3,6)$ ;  $\lambda_2 = \lambda(17,7)$ .

Для случая трех экспоненциального роста (2.13) электропроводности было получено решение о распределении  $E$  в нижних слоях атмосферы. Как оказалось, в данном случае при неизменном  $\varphi_\infty$  напряженность электрического поля увеличивает почти в 5 раз по сравнению со значениями для условия (2.12) [82].

Стоит отметить, что в пограничном слое до 2 км за счет гидродинамических турбулентных процессов в пыльной атмосфере, электропроводность с высотой изменяется достаточно слабо, что в ряде случаев позволяет рассматривать ее, как постоянную. Выше пограничного слоя же она растет по экспоненциальному закону.

Кроме высотного распределения  $\lambda$  существует также меридиональное распределение. Данный феномен связывают с изменением интенсивности космических лучей, которая уменьшается от полюса к экватору в два раза. Подобное распределение описывается следующими уравнениями [14]:

$$\begin{aligned} \lambda_0(\theta) &= \lambda_0 \left\{ 1 + \frac{\Delta F}{2} \{1 + \cos[3(\theta - 30^\circ)]\} \right\}, & 30^\circ < \theta < 150^\circ, \\ \lambda_0(\theta) &= \lambda_0(1 + \Delta F), & \theta < 30^\circ, \theta > 150^\circ, \\ \theta &= \frac{\pi}{2} - \tilde{\varphi} \text{ в северном полушарии,} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \tilde{\varphi} \text{ в южном полушарии,}$$

где  $\tilde{\varphi}$  – широта места;  $\Delta F = 0,4$ .

На высотах более 70 км в большей степени начинает проявляться так называемая электронная проводимость, которая в более низких слоях имеет малозначимую роль поскольку время рекомбинации электронов с нейтральными молекулами происходит за время  $10^{-2}$ - $10^{-7}$  с, создавая отрицательные аэроионы. Основную роль в верхних слоях атмосферы вблизи магнитных линий Земли играют три элемента электрической проводимости:

$$\begin{aligned}\tilde{\lambda}_0 &= e^2 N \left( \frac{1}{m_e \nu_e} + \frac{1}{m_i \nu_i} \right) \\ \tilde{\lambda}_1 &= e^2 N \left( \frac{\nu_e}{m_e (\nu_e^2 + \omega_e^2)} + \frac{\nu_i}{m_i (\nu_i^2 + \omega_i^2)} \right) \\ \tilde{\lambda}_2 &= e^2 N \left( \frac{\omega_e}{m_e (\nu_e^2 + \omega_e^2)} + \frac{\omega_i}{m_i (\nu_i^2 + \omega_i^2)} \right)\end{aligned}\tag{2.15}$$

где,  $N$  – концентрация электронов и положительных ионов,

$e$  – заряд электрона,

$m_e, m_i$  – массы электронов и ионов;

$\nu_e, \nu_i$  – электронная и ионная частоты столкновения с нейтральными молекулами;

$\omega_e = e|\vec{H}_0|/m_e$ ,  $\omega_i = e|\vec{H}_0|/m_i$  – гиромагнитные частоты электронов и ионов;

$\vec{H}_0$  – вектор магнитного поля;

$\tilde{\lambda}_0$  – электрическая проводимость, соответствующая электрическому полю, направленному вдоль  $\vec{H}_0$ ;

$\tilde{\lambda}_1$  – проводимость Педерсона, соответствующая электрическому полю, направленному перпендикулярно  $\vec{H}_0$ ;

$\tilde{\lambda}_2$  – проводимость Холла, соответствующая направлению перпендикулярно  $\vec{E}$  и  $\vec{H}_0$ .



При уменьшении высоты ниже 70 км, влияние магнитного поля значительно падает, из чего следует, что вклад гиромангнитных частот значительно уменьшается ( $\nu_e \gg \omega_e, \nu_i \gg \omega_i$ ). Как следствие, уравнения (2.14) допускают  $\tilde{\lambda}_0 \approx \tilde{\lambda}_1 \gg \tilde{\lambda}_2$ , что говорит о некоей изотропности электрической проводимости на данных высотах. Помимо этого, как говорилось ранее, в слоях атмосферы ниже 70 км вместо электронов присутствуют более тяжелые отрицательные ионы. Можно сделать вывод, что в тропосфере эффекты, связанные с магнитным полем, незначительны, но при этом их необходимо принимать во внимание при рассмотрении связи ионосферы и магнитосферы с нижними слоями атмосферы.

Вследствие анизотропности электрической проводимости, возникающей в слоях выше 70 км выражение для полной плотности электрического тока (2.3) будет принимать следующий вид [25]:

$$\vec{j} = \tilde{\lambda}_0 \vec{E}_0 + \tilde{\lambda}_1 \vec{E}_1 + \tilde{\lambda}_2 \frac{\vec{E}_1 \times \vec{H}_0}{|\vec{H}_0|} \quad (2.16)$$

где  $\vec{E}_0$  – компонента электрического поля, параллельная  $\vec{H}_0$ ;

$\vec{E}_1$  – компонента электрического поля, перпендикулярная  $\vec{H}_0$ .

Первое уравнения системы (2.2) для квазистационарного случая можно записать в терминах потенциала  $\vec{E} = -\nabla\varphi$ , где  $\varphi$  – потенциал электрического поля. Выражая плотность распределения зарядов через потенциал из уравнения Пуассона ( $\rho = -\Delta\varphi$ ), выражение (2.16) принимает следующий вид:

$$\vec{j} = -\lambda \nabla\varphi - \varepsilon_0 \vec{\nu} \Delta\varphi - \varepsilon_0 D_T \nabla\Delta\varphi + \sum_i \vec{j}_i \quad (2.17)$$

Подставляя получившееся выражение в уравнение для плотности заряда в системе (2.2) получаем:

$$\varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \Delta\varphi + \nabla(\lambda \nabla\varphi) + \nabla(\vec{\nu} \Delta\varphi) + \varepsilon_0 \nabla(D_T \nabla\Delta\varphi) = \sum_i \text{div} \vec{j}_i, \quad (2.18)$$

Подобным же образом можно записать уравнение (2.14), принимая  $\vec{E}_0 = -(\nabla\varphi)_\parallel$ ,  $\vec{E}_1 = -(\nabla\varphi)_\perp$ :

$$\vec{j} = \tilde{\lambda}_0(\nabla\varphi)_{\parallel} + \tilde{\lambda}_1(\nabla\varphi)_{\perp} + \tilde{\lambda}_2 \frac{(\nabla\varphi)_{\perp} \times \vec{H}_0}{|\vec{H}_0|}, \quad (2.19)$$

Следовательно, уравнение для плотности заряда в верхних слоях атмосферы, получает вид:

$$\varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \Delta\varphi + \nabla[\tilde{\lambda}_0(\nabla\varphi)_{\parallel}] + \nabla[\tilde{\lambda}_1(\nabla\varphi)_{\perp}] + \nabla\left[\tilde{\lambda}_2 \frac{(\nabla\varphi)_{\perp} \times \vec{H}_0}{|\vec{H}_0|}\right] = 0, \quad (2.20)$$

Полученные уравнения (2.18) и (2.20), при различных граничных и начальных условиях являются основными при физико-математическом моделировании глобальной электрической цепи.

### 2.3. Модели глобальной электрической цепи

Одной из первых моделей ГЭЦ, остающейся актуальной до сих пор является модель Вильсона, рассматривающая поверхность Земли и верхние слои атмосферы, которые имеют высокую электропроводность, как проводящие обкладки сферического конденсатора (рис. 2.1). В данной модели существование электрического поля в нижних слоях атмосферы объясняется наличием зарядов:  $Q_-$  для поверхности Земли,  $Q_+$  для проводящих слоев атмосферы. Как следствие, эти заряды создают разности потенциалов  $\Delta\varphi$ , в силу чего в атмосфере наблюдается электрическое поле  $\vec{E}$ . По причине существования электропроводности воздуха, в атмосфере между этими слоями возникает электрический ток  $I_p$ , текущий с верхних слоев, за которые, как оказалось впоследствии, можно принимать ионосферу. Данный ток, как говорилось ранее, должен разряжать конденсатор за достаточно короткое время  $\sim 10$  минут, чего не происходит.

В модели Вильсона предполагается наличие, так называемого, тока зарядки  $I_z$ , который поддерживает заряды на обкладках конденсатора и компенсирует действие  $I_p$ . По существующей теории,  $I_z$  возникает в областях атмосферы, где

присутствуют грозовые облака и в которых направление  $\vec{E}$  обратно направлению в областях хорошей погоды [2].

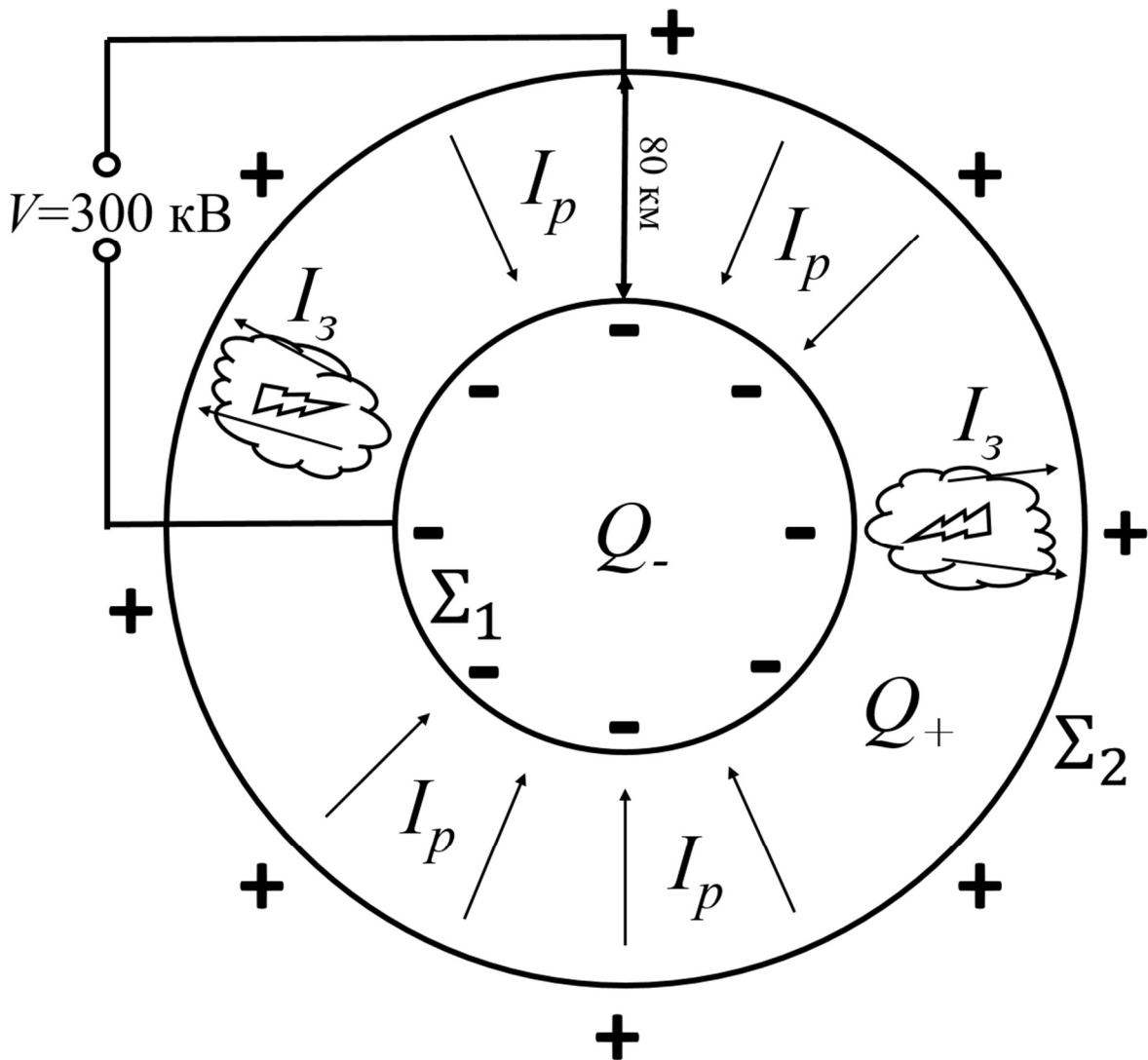


Рисунок 2.1 - Схематичная изображение модели Вильсона для ГЭЦ [23].

Из уравнения (2.18) для рассматриваемой модели можно получить преобладающее количество математических зависимостей. В квазистационарном случае ( $T \gg \tau_\lambda$ ) в отсутствии грозовых источников и высоте атмосферы  $\Delta H \ll r_0$  из уравнения (2.18) следует соотношение:

$$j_0 = \lambda E_r, \quad (2.21)$$

где  $j_0$  – плотность электрического тока;  $E_r$  – радиальная составляющая напряженности электрического поля.

Выражая вертикальную составляющую  $\varphi$  через напряженность электрического поля и подставляя в полученное уравнение  $E_r$ , выраженное из (2.21) получим:

$$\varphi = j_0 R_e, \quad R_e = \int_{r_0}^r \frac{dr}{\lambda}, \quad (2.22)$$

где  $R_e$  – сопротивление единичного столба атмосферы.

Полагая, что  $r = \infty$ , получим следующие соотношения:

$$j_0 = -\frac{\varphi_\infty}{R_{e\infty}}, \quad E_r = -\frac{\varphi_\infty}{\lambda R_{e\infty}}, \quad \varphi = \varphi_\infty \frac{R_e}{R_{e\infty}} \quad (2.23)$$

Полные сопротивление и ток в атмосфере выражаются:

$$R_e = \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{4\pi r^2 \lambda(r)}, \quad I = 4\pi r_0^2 \lambda(r_0) E_r^0, \quad R_{e\infty} = \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{\lambda} \quad (2.24)$$

Учитывая экспоненциальный характер электропроводности в атмосфере (2.6), из соотношений (2.23) и (2.24) получаем:

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{1}{\lambda_0 \alpha} [1 - \exp(-\alpha - (r - r_0))], \quad R = \frac{1}{\lambda_0 \alpha \cdot 4\pi r_0^2}, \\ \varphi(r) &= -\frac{j_0}{\lambda_0 \alpha} [1 - \exp(-\alpha - (r - r_0))] \\ E_r &= \frac{j_0}{\lambda_0} \exp(-\alpha - (r - r_0)). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Принимая во внимание то факт, что заряд ионосферы формируется за счет грозовых облаков, можно связать потенциал ионосферы  $\varphi_\infty$  с числом грозовых генераторов, протекающих в данный момент по всему земному шару следующим выражением:

$$\varphi_\infty = R \sum_i \frac{R_{1i}}{R_{ci}} I_i, \quad (2.26)$$

где  $R_{1i}$  – внутренне сопротивление грозового генератора;  $R_{ci}$  – суммарное сопротивление в области грозового генератора ( $R_{ci} = R_{1i} + R_{2i} + R_{3i}$ );  $I$  – суммарный ток, текущий от грозовых генераторов в ионосферу. На рисунке 2.2 представлена эквивалентная электрическая схема работы грозового генератора.

По аналогии с (2.19) выражение (2.20) принимает следующий вид:

$$\varphi_{\infty} = \frac{1}{4\pi r_0^2 \alpha} \sum_i I_i \left( \frac{1}{\lambda_{i-}} - \frac{1}{\lambda_{i+}} \right), \quad (2.27)$$

где  $\lambda_{i-}, \lambda_{i+}$  – электропроводности вблизи отрицательного  $q_{i-}$  и положительного  $q_{i+}$  зарядов  $i$ -го грозового облака;

$I_i$  – ток заряжения, создаваемый за счет процессов разделения зарядов в облаке.

В стационарном случае  $q_{i+}, q_{i-}$  и  $I_i$  связаны между собой следующим соотношением:

$$I_i = 4\pi\lambda_{i+}q_{i+} = 4\pi\lambda_{i-}q_{i-}. \quad (2.28)$$

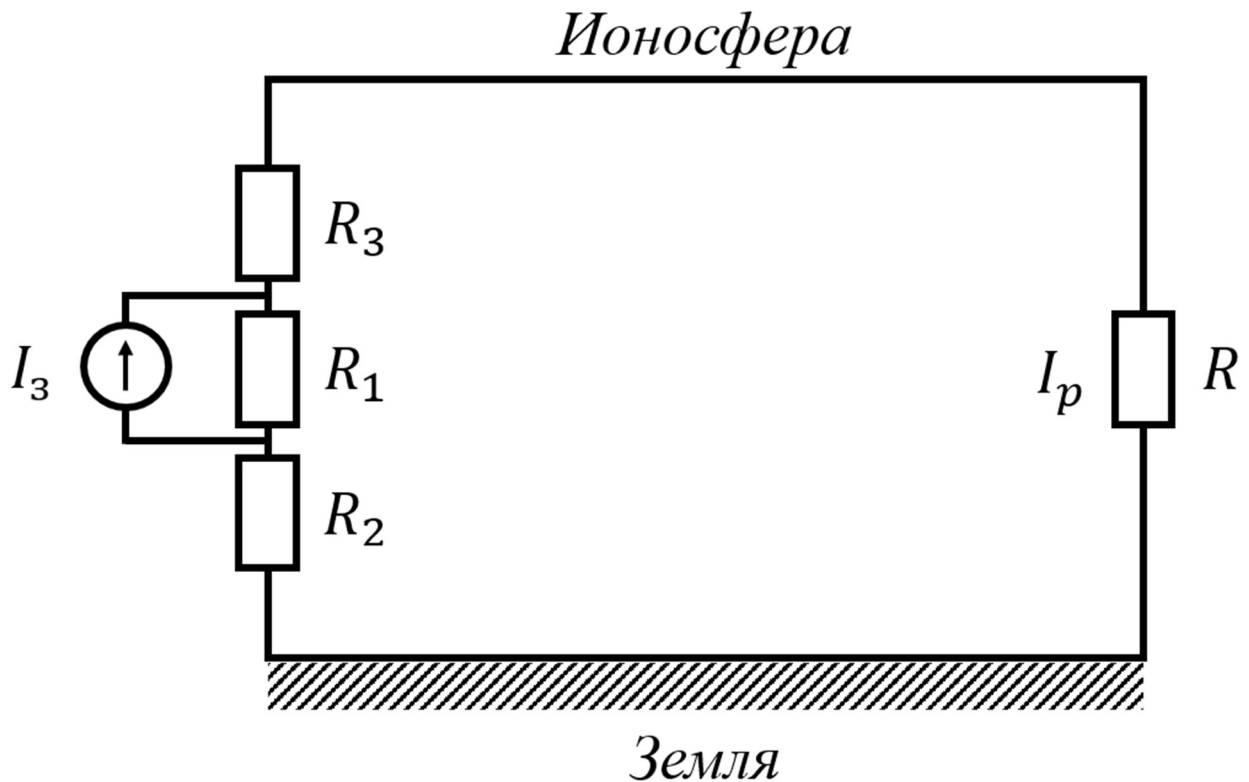


Рисунок 2.2 - Эквивалентная электрическая схема ГЭЦ [23].

В работе [83] приведены оценочные значения  $I = I_p = 1000$  А,  $R = 230$  Ом, а также средние, полученные экспериментальным путем:  $\varphi = 278$  кВ,  $R_{e\infty} = 1,3 \cdot 10^{17}$  Ом,  $j = 2 \cdot 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>. При этом, на слой высотой до 2 км приходится порядка 60%  $R_{e\infty}$ , на последующие слои до 10 км – 20%  $R_{e\infty}$  и, как следствие, на слои атмосферы в диапазоне 10...80 км остается 20% полного сопротивления столба атмосферы. При высотных зондировках атмосферы для  $\varphi_{\infty}$  были получены значения, лежащие в диапазоне 145...608 кВ [83].

Ввиду того, что модель Вильсона предполагает  $I_p = I_3$ , чтобы оценить вклад грозовых облаков, как генераторов, следует знать ток, создаваемый ими и их число, действующих в единицу времени. По данным наблюдений, средний ток, генерируемый одной грозовой ячейкой составляет 0,5-1 А, при том, что ток создаваемый одной грозой, колеблется в пределах 0,1-6 А. На любой момент времени приходится 1500-1800 гроз, происходящих на земном шаре, как следствие, создаваемый ими ток составляет 800...1800 А. Расчет электрического тока, текущего от единичного грозового генератора в ионосферу для атмосферы с экспоненциально растущей электропроводностью (2.12), производится по формуле [83]:

$$I_i = 4\pi\lambda_0 q_{i+} \frac{\exp(\alpha(z_{i+} - z_{i-})) - 1}{1 - \exp(-\alpha h)}, \quad (2.29)$$

где  $h$  – высота до проводящих слоев атмосферы;

$z_{i+}$ ,  $z_{i-}$  – расстояния до зарядов диполя.

При  $\alpha h \gg 1$ , вторым слагаемым в знаменателе можно пренебречь и получим уравнение, связывающее  $q_{i+}$  и  $q_{i-}$ :

$$q_{i+} = -q_{i-} \exp(\alpha(z_{i+} - z_{i-})). \quad (2.30)$$

В таблице 2.2 представлены расчетные данные, показывающие изменение тока с увеличением расстояния между диполями, при  $q_{i+} = 20$  Кл,  $z_{i-} = 5$  км,  $\lambda_0 = 6 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>,  $I_{i-} = 4\pi q_{i-} \lambda_0 \exp \alpha z_{i-}$ .

Из таблицы видно, что при  $z_{i+} - z_{i-} \geq 7$  км ток  $I_i$  приближается к значениям, позволяющим поддерживать  $I_p$ . Подобная ситуация возможна при полном

разрядении отрицательного заряда на поверхность Земли или же при достаточно частых разрядах этого знака, таких, что они не вносят вклад в стационарный режим токов в атмосфере. Более конкретное влияние грозовых генераторов, как в полномасштабном, так и локальном формате можно получить, решая уравнение:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} \varphi) = -4\pi\lambda \sum_i q_i \delta(r - r_i), \quad (2.31)$$

где  $q_i, r_i$  – заряд и радиус-вектор  $i$ -го грозового источника;

$\delta(r - r_i)$  – функция Дирака.

Таблица 2.2

Зависимость тока, текущего в верхние слои атмосферы, от расстояния между зарядами диполя.

| $z_{i+} - z_{i-}, \text{ км}$ | $I_i, \text{ А}$ | $I_{i-}, \text{ А}$ | $q_{i-}, \text{ Кл}$ |
|-------------------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| 0                             | 0,00             | 0,41                | 20                   |
| 1                             | 0,03             | 0,50                | 24                   |
| 2                             | 0,07             | 0,61                | 30                   |
| 3                             | 0,12             | 0,75                | 36                   |
| 4                             | 0,19             | 0,91                | 45                   |
| 5                             | 0,26             | 1,12                | 55                   |
| 7                             | 0,46             | 0                   | 0                    |

Рассматривая влияние гроз, как источников тока, через функцию Дирака, предполагается, что они являются точечными, что достаточно справедливо при расстояниях, превышающих характерные размеры областей распределения зарядов грозового облака.

В «классической» модели шарового конденсатора не рассматривается связь электрических процессов, протекающих в нижних слоях атмосферы, с электрическими процессами, возникающими в ионосфере и магнитосфере. В этом случае, граничные и начальные условия при решении (2.31) имеют следующий вид:

$$\varphi|_{\Sigma_1} = 0; \quad \frac{1}{4\pi} \oint_{\Sigma_2} \varphi d\Omega = \varphi_\infty \quad \text{или} \quad \varphi|_{\Sigma_2} = \varphi_\infty; \quad (2.32)$$

$$\varphi|_{t=0} = \varphi_0,$$

где  $\Sigma_1$  – проводящая поверхность Земли;

$\Sigma_2$  – некая проводящая поверхность, расположенная на достаточном расстоянии от  $\Sigma_1$  (для конкретного случая расположена на высоте нижней границы ионосферы);

$\Omega$  – телесный угол;

$\varphi_\infty$  – потенциал на уровне поверхности  $\Sigma_2$ ;

$\varphi_0$  определяется электрическим полем, удовлетворяющим граничным условиям.

Учитывая (2.12) при  $\alpha = 0,2$  км и, принимая (2.32), решение для (2.31) будет иметь следующий вид:

$$\varphi(\vec{r}) = \sum_i q_i G_i + \varphi_\infty [1 - \exp(-\alpha(r - r_0))],$$

$$G_i(\vec{r}, \vec{r}_i) = \exp\left(-\frac{\alpha}{2}(r - r_0)\right) \left[ \frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2}\rho_i\right)}{\rho_i} - \frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2}\rho'_i\right)}{\rho'_i} \right], \quad (2.33)$$

где  $G_i$  – функция Грина;

$\rho_i = |\vec{r} - \vec{r}_0|$ ;

$\rho'_i$  – расстояние от точки наблюдения до заряда изображения.

Анализируя полученное решение, можно оценить расстояние, до куда распространяются воздействие грозового генератора. Из уравнения для  $G_i$  следует, что данное воздействие простирается при  $|\vec{r} - \vec{r}_0| \gg 2\alpha^{-1}$  или  $|\vec{r} - \vec{r}_0| \gg 10$  км. В физическом смысле это определяется тем, что поляризационный заряд, возникающий в атмосфере, по причине неоднородного проведения электрической проводимости атмосферы экранирует заряд грозового генератора. Стоит отметить, что при  $\alpha = 0$  данный эффект пропадает и поле заряда становится кулоновским.

Потенциал ионосферы  $\varphi_\infty$  выражается из условия стационарности:



$$\oint_S \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} dS = 0, \quad (2.34)$$

где  $S$  – поверхность, лежащая выше или ниже грозových источников.

Данное условие говорит о том, что полный ток, текущий через замкнутую поверхность, при стационарном рассмотрении равен нулю. Выражение для потенциала ионосферы при таком условии, будет иметь следующий вид:

$$\varphi_\infty = \frac{1}{4\pi r_0^2 \alpha} \sum_i I_i \left( \frac{1}{\lambda_{i-}} - \frac{1}{\lambda_{i+}} \right) \frac{\lambda_i}{\bar{\lambda}}, \quad (2.35)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{4\pi} \oint \lambda d\Omega,$$

где  $\lambda_i$  – электрическая проводимость под  $i$ -м грозovým генератором,  $\bar{\lambda}$  – средняя электрическая проводимость над поверхностью Земли.

В предыдущей главе упоминалось о том, что была построена модель ГЭЦ с учетом орографических особенностей земной поверхности в криволинейных квадратах со стороной  $5^\circ$  по широте и долготе. Электропроводность в полученной модели определялась следующим образом:

$$\lambda(z, \theta) = \lambda_r(\theta) \exp(\alpha z), \quad z \geq z_1,$$

$$\lambda(z, \theta) = \lambda_s(\theta) \exp\left(\frac{z}{\beta(\theta)}\right), \quad z < z_1,$$

$$\lambda_r(\theta) = \lambda_0 \left\{ 1 + \Delta F \left\{ 1 + \cos \frac{[3(\theta - 30^\circ)]}{2} \right\} \right\}, \quad 30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ, \quad (2.36)$$

$$\lambda_r(\theta) = \lambda_0(1 + \Delta F), \quad \theta < 30^\circ, \quad \theta > 150^\circ$$

$$\beta(\theta) = \frac{z_1}{\ln \left[ \frac{\lambda_r}{\lambda_s} \exp(\alpha z_1) \right]},$$

где  $\lambda_s$  – электрическая проводимость на уровне моря;

$\lambda_0$  – электрическая проводимость на экваторе ( $\theta = \pi/2$ );

$(1 + \Delta F)$  – отношение электрической проводимости на полюсах к электрической проводимости на экваторе [28,84].

Из данных соотношений следует, что для получения полного профиля электрической проводимости необходимо задать следующие параметры:  $\lambda_s$ ,  $\lambda_0$ ,  $\alpha$ ,  $z_1$ ,  $z_m$  и  $\Delta F$ . Значения всех задаваемых параметров приведены в таблице 2.3. Данные параметры использовались для расчетов физико-математической модели.

Таблица 2.3

Параметры для вычисления полного профиля электрической проводимости воздуха в слое от поверхности Земли до верхней границы ионосферы

| Параметр                                                   | Обозначение | Значение                  |
|------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------|
| Электрическая проводимость:                                |             |                           |
| – на уровне моря;                                          | $\lambda_s$ | $2,2 \cdot 10^{-14}$ См/м |
| – на экваторе.                                             | $\lambda_0$ | $1,1 \cdot 10^{-13}$ См/м |
| Масштаб высоты электрической проводимости в верхних слоях. | $\alpha$    | 8 км                      |
| Высота границы, разделяющей два проводящих слоя.           | $z_1$       | 8 км                      |
| Высота верхней границы.                                    | $z_m$       | 60 км                     |
| Широтный фактор вариации электрической проводимости.       | $\Delta F$  | 1                         |

Полученный при моделировании профиль электрической проводимости достаточно хорошо согласуется с натурными экспериментами [14,81]. При расчетах большое значение уделяется выбору модели грозового облака, которая, как и в большинстве случаев имеет вид диполя с положительно заряженной верхней границей и отрицательно – нижней. Также полагалось, что для зарядов диполя выполняется условие стационарности (2.28). Высота зарядов определялись выражениями:

$$\begin{aligned} z_+(\theta_i) &= z_{+0} - \Delta z \cos \theta_i, \\ z_-(\theta_i) &= z_+(\theta_i) - \Delta H, \end{aligned} \quad (2.37)$$

где  $z_{+0}$  – высота положительного заряда грозового облака на экваторе;

$\Delta z$  – разница между высотами зарядов на полюсе и на экваторе;

$\Delta H$  – расстояние между диполем. В данной модели полагается  $z_{+0} = 9$  км,  $\Delta z = 4$  км,  $\Delta H = 3$  км.

Исходя из рисунка 2.3, можно провести приблизительную оценку электрического тока, текущего от грозового генератора в ионосферу в виде следующего выражения:

$$I_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3 + r} I_0 \quad (2.38)$$

где  $R_1$  – сопротивление между зарядами диполя;

$R_2$  – сопротивление между положительным зарядом и ионосферой;

$R_3$  – сопротивление между отрицательным зарядом и земной поверхностью;

$r$  – глобальное сопротивление между земной поверхностью и ионосферой;

$I_0$  – ток, который соответствует току  $I_i$  в грозовом генераторе.

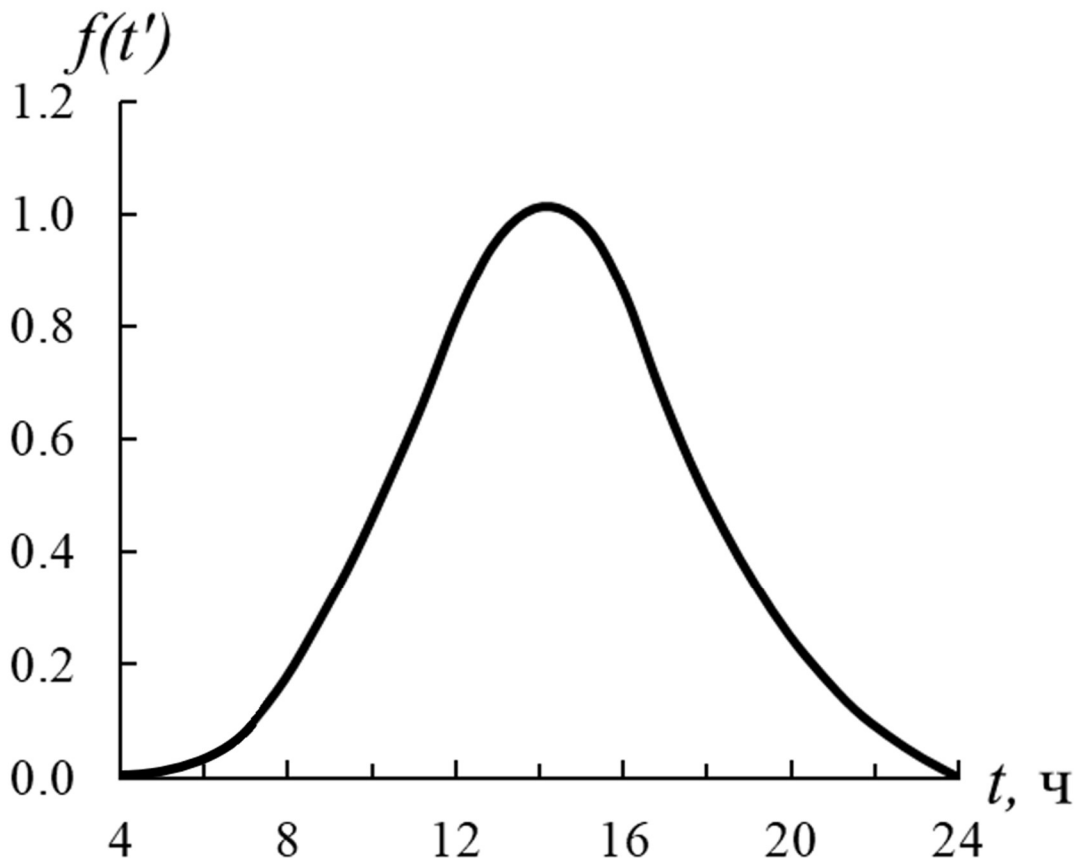


Рисунок 2.3 - Зависимость интенсивности грозовой активности от местного времени [25].

Поскольку  $r \gg R_1, R_2, R_3$ :

$$I_3 \approx \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} I_0 \quad (2.39)$$

При расчетах (2.38) проще выразить через плотность электрического тока в виде:

$$j_3(\theta_i, \varphi_j, t) = \frac{R_1(\theta_i)}{R_C(\theta_i, \varphi_i)} j(\theta_i, \varphi_j, t),$$

$$R_1(\theta_i) = \int_{z_-(\theta_i)}^{z_+(\theta_i)} \frac{dz}{\lambda(z, \theta_i)}, \quad (2.40)$$

$$R_C(\theta_i, \varphi_j) = \int_{H(\theta_i, \varphi_i)}^{z_m} \frac{dz}{\lambda(z, \theta_i)},$$

где  $t$  – среднее время по ВСВ;

$H(\theta_i, \varphi_i)$  – высота 5-градусной ячейки над уровнем моря, имеющей координаты  $(\theta_i, \varphi_j)$ .

Плотность электрического тока единичного грозового генератора распределялась согласно результатам работы [84]. Из работы следует, что активные грозовые области, в которых  $j_0$  максимальна и ее значение составляет  $77,14 \cdot 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>, существуют в различных регионах. При моделировании суточной вариации потенциала ионосферы рассматривалась интенсивность гроз, которая задавалась временной функцией, имеющей вид Гауссового распределения с максимумом в 16 часов местного времени (рис. 2.3):

$$f(t') = \exp \left[ - \left( \frac{t' - t_0 + 24}{\tau} \right)^2 \right], \quad 0 \leq t' < 4,$$

$$f(t') = \exp \left[ - \left( \frac{t' - t_0}{\tau} \right)^2 \right], \quad 4 < t' < 24, \quad (2.41)$$

где  $t'$  - местное время;

$t_0$  – местное время, когда  $i_0(\theta_i, \varphi_i, t)$  максимальна;

$\tau$  – стандартное отклонение. При расчете модели принималось  $t_0 = 16$  ч,  $\tau = 3$  ч.

Тогда:

$$i_0(\theta_i, \varphi_j, t) = i_0(\theta_i, \varphi_j) f(t'), \quad (2.42)$$

где  $t'$  зависит от долготы  $\varphi_j$  и всемирному скоординированному времени  $t$ .

Из выражений (34) и (36) можно получить  $I_B(\theta_i, \varphi_j, t)$  для отдельно взятой 5-градусной ячейки:

$$I_B(\theta_i, \varphi_j, t) = \frac{R_1(\theta_i)}{R_C(\theta_i, \varphi_i)} i_0(\theta_i, \varphi_j) f(t') dS(\theta_i) \quad (2.43)$$

где  $dS(\theta_i)$  – площадь ячейки 5-градусной сетки при  $\theta_i$ . Просуммировав по всем площадям  $(i, j)$  можно получить общий ток зарядки, текущий от всех грозовых генераторов:

$$I_3 = \sum_{i,j} I_B(\theta_i, \varphi_j, t), \quad (2.44)$$

Соответственно, выражение для потенциала ионосферы будет выглядеть следующим образом:

$$\varphi_\infty(t) = R I_3 \quad (2.45)$$

где  $R$  – глобальное сопротивление.

Плотность тока разрядки, текущего от ионосферы к земной поверхности в районах не занятых грозовыми генераторами, будет иметь следующий вид:

$$i_z(\theta_i, \varphi_j, t) = \frac{\varphi_\infty(t)}{R_C(\theta_i, \varphi_i)}. \quad (2.46)$$

Уравнение для напряженности электрического поля:

$$E_z(z, \theta_i, \varphi_j, t) = \frac{i_z(\theta_i, \varphi_j, t)}{\lambda(z, \theta_i)}. \quad (2.47)$$

Для регионов, охваченных грозовой деятельностью, (2.46) и (2.47) принимают вид:

$$i'_z(\theta_i, \varphi_j, t) = \frac{\varphi_\infty(t)}{R_C(\theta_i, \varphi_i)} - i_B(\theta_i, \varphi_j, t) \quad (2.48)$$

$$E'_z(z, \theta_i, \varphi_j, t) = \frac{i'_z(\theta_i, \varphi_j, t)}{\lambda(z, \theta_i)}. \quad (2.49)$$

Из рассмотренной модели Вильсона были рассчитаны суточные вариации потенциала ионосферы и полного тока зарядки, графики полученных результатов приведены на рисунке 2.4. Из полученных графиков видно наличие большого максимума (20 часов ВСВ) и двух полумаксимумов, приходящихся на 6 и 15 часов ВСВ. Данные максимумы относятся к тем моментам времени, когда проявляется наибольшая грозовая активность в Азии, Океании, Африке и Америке. В среднем, значения для потенциала равны 293 кВ, а для тока 1254 А, при этом отклонения в максимальную и минимальную стороны составляют порядка 20%, глобальное же сопротивление составило 233 Ом. Суточные вариации потенциала ионосферы

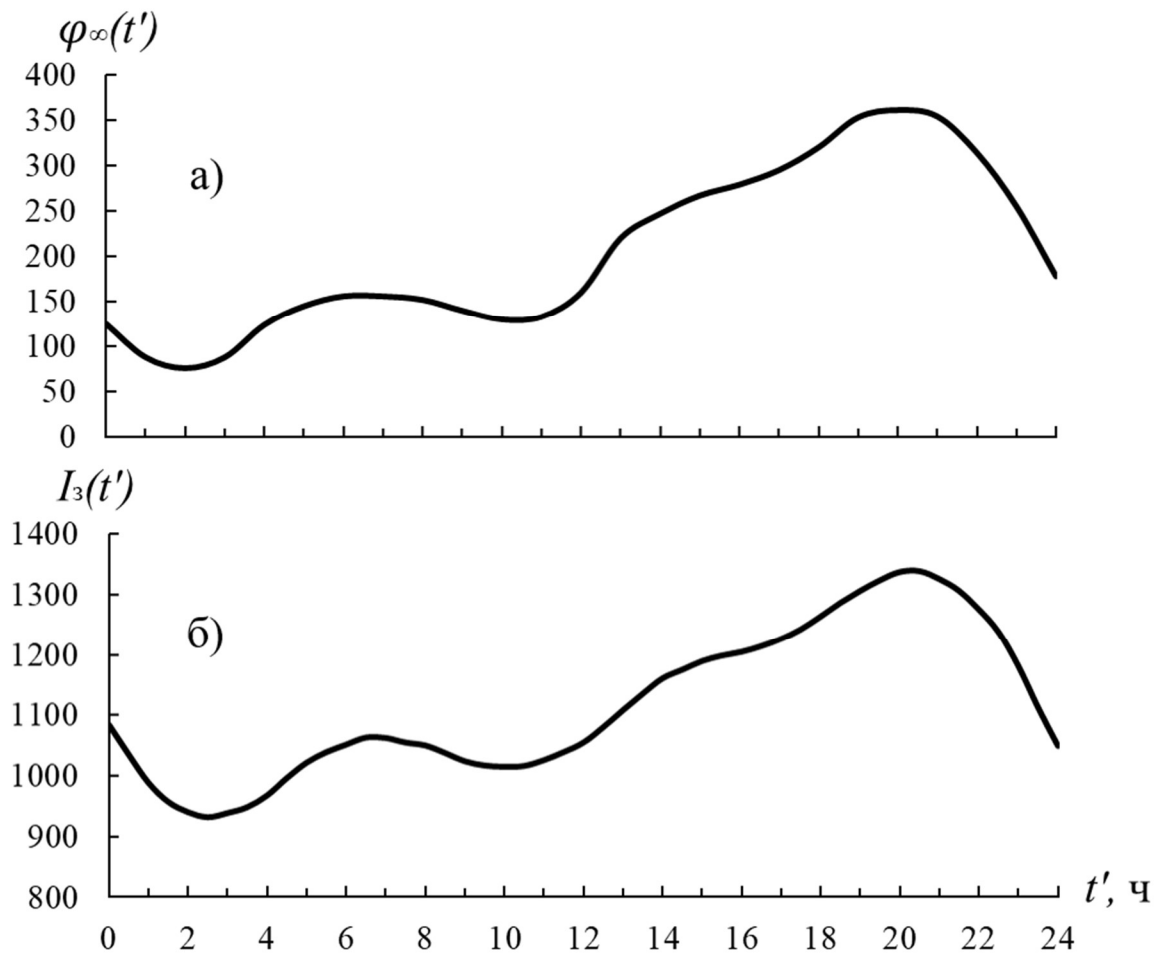


Рисунок 2.4 - Унитарные вариации  $\varphi_{\infty}(t)$  (а) и  $I_3(t')$  (б), полученные при модельных расчетах [25].

соответствуют унитарным вариациям напряженности электрического поля в приземном слое над океанами, в горах или же в незагрязненных областях. Из модельных данных видно, что  $i_z$  зависит от особенностей рельефа земной поверхности, так, например, в горах Тибета в 20 часов ВСВ  $i_z = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$ , тогда как над океанами в экваториальной зоне в это же время  $i_z = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$ .

Эффект влияния рельефа земной поверхности проявляется за счет того, что в зависимости от высоты места, меняется электрическое сопротивление столба атмосферы, вследствие чего меняется и плотность тока. К примеру, в горах сопротивление ниже, чем над океанами и, как следствие, плотность тока выше. Помимо орографического эффекта существует также влияние широты местности. Плотность тока на полюсах выше плотности тока на экваторе в 20 часов ВСВ примерно на 30%. Широтный эффект также проявляется и при наблюдениях за напряженностью электрического поля в приземном слое. Наблюдения показывают, что в 20 часов в полярных областях напряженность поля выше на те же 30%, чем на экваторе [84].

Помимо модели Вильсона существует более развитая математическая модель Робла-Хейса [14, 15], которая была упомянута в предыдущей главе. Данная модель включает в себя описание орографических особенностей земной поверхности, только вместо условного предположения об эквипотенциальной ионосфере здесь применяется условность об эквипотенциальности силовых линий в ионо- и магнитосферах. В данной модели вместо (2.32) при решении (2.31) применяются следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \varphi(\lambda_m, \mu, \hat{\varphi}) &= \varphi(\lambda_m, -\mu, \hat{\varphi}), \\ \frac{\partial \varphi}{\partial(\lambda)}(\lambda_m, \mu, \hat{\varphi}) &= \frac{\partial \varphi}{\partial(\lambda)}(\lambda_m, -\mu, \hat{\varphi}), \end{aligned} \quad (2.50)$$

где  $\mu = \cos \theta$ ,

$\theta, \hat{\varphi}$  – широта и долгота,

$\lambda_m$  – электрическая проводимость на высоте магнитосферы ( $z_m \approx 105 \text{ км}$ ).

Графическая схема модели Робла-Хейса представлена на рисунке 2.5.

Помимо самой модели на данном рисунке схематически изображены все известные на данный момент электрические процессы, протекающие в земной атмосфере. Это и грозовые генераторы, и ионосферный, и магнитосферный генераторы. Также изображены ионизирующие процессы такие, как, действующие в верхней атмосфере ГКЛ СКЛ, а в приземном слое эманации почвенного радона.

Ниже, в табл. 2.4. представлены некоторые результаты расчетов изменений  $\varphi - \varphi_{\infty}, i, E, I_3$  на 19 ч по ВСВ.

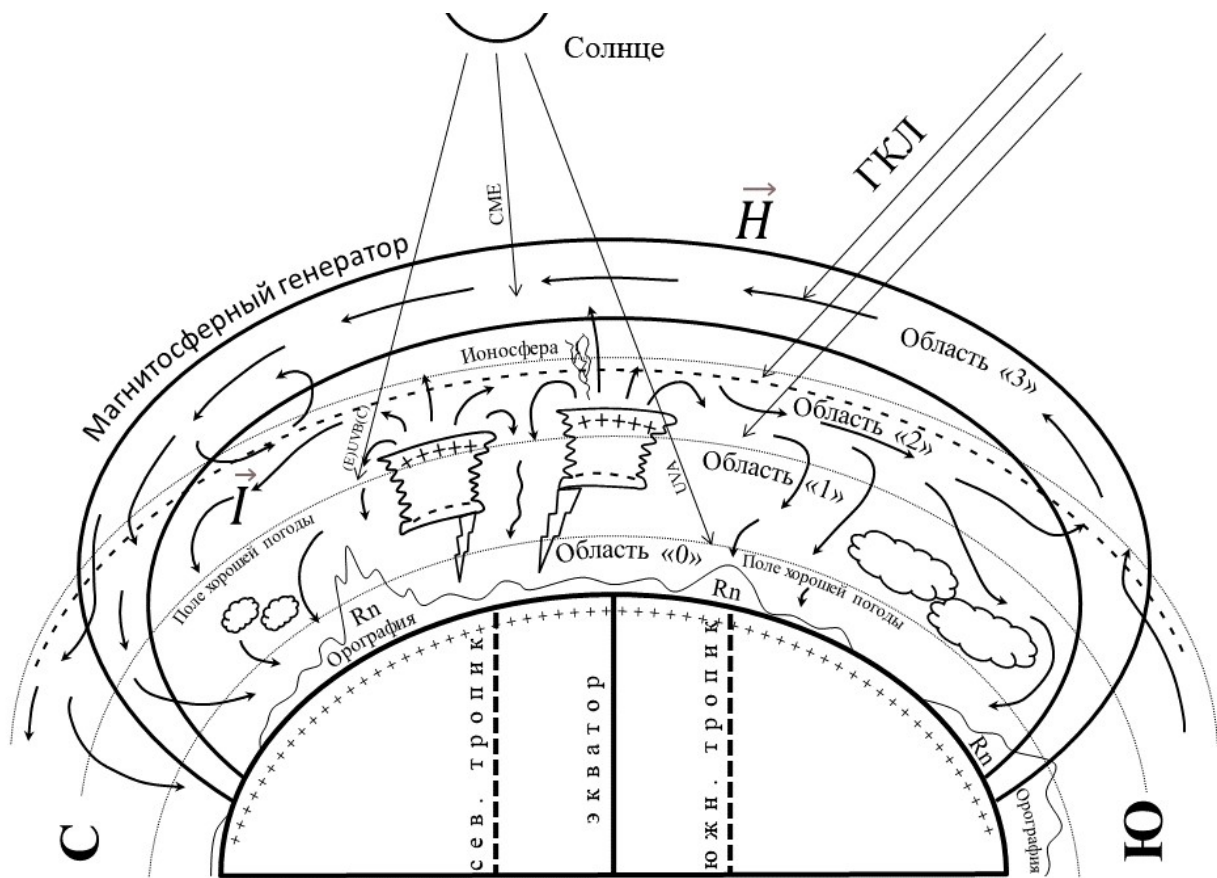


Рисунок 2.5 - Схема модели Робла-Хейса:

Область «0» – орография Земли и приземный слой атмосферы;

Область «1» – верхняя тропосфера с грозовыми очагами;

Область «2» – стратосфера и мезосфера;

Область «3» – ионосфера и магнитосфера;

$\vec{H}$  – силовые линии магнитного поля, стрелками обозначено течение электрического тока  $\vec{I}$  [8,9].



Таблица 2.4

Значения глобальных параметров потенциала ионосферы  $\varphi_{\infty}$  и полного тока  $I_3$ , рассчитанные для модели Робла-Хейса для некоторых региональных вариантов и условий [84]

| Расчетная модель                             | $\varphi_{\infty} \cdot 10^{-3}$<br>, В | $I_3$ , А | Электрическое поле, В/м |       | $R$ , Ом |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|-------------------------|-------|----------|
|                                              |                                         |           | экватор                 | полюс |          |
| Горные районы                                | 291                                     | 1065      | 134                     | 173   | 273      |
| Горные районы с учетом океанических гроз     | 243,8                                   | 893       | 113                     | 146   | 273      |
| Горные районы с учетом гроз южного полушария | 338                                     | 1256      | 156                     | 203   | 273      |
| Сферическая модель                           | 299                                     | 884       | 136                     | 178   | 338      |

Стоит отметить, для того чтобы смоделировать стационарное состояние глобальной токовой цепи при нестационарных атмосферных процессах, необходимо выполнение условия  $T \gg \tau_{\lambda}$ , где  $T$  – время, которое характеризует грозовую деятельность (изменение токов, текущих от гроз),  $\tau_{\lambda}$  – время электрической релаксации.

## 2.4. Влияние слоев аэрозольных частиц на ГЭЦ

Допуская сферическое приближение с началом координат в центре Земли, для стационарного случая имеем уравнение, следующее из уравнения:

$$\nabla(\lambda(r)\nabla\varphi) = 0, \quad (2.51)$$

$$\lambda(r) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (2.52)$$

где  $\lambda$  – электрическая проводимость воздуха, обусловленная положительными и отрицательными аэроионами;

$r$  – расстояние от центра Земли.

Для электрической проводимости используется следующее представление:

$$\begin{aligned}\lambda(r) &= \eta \lambda_0 e^{\alpha(r-r_0)}, & r - r_0 \in [0, H) \text{ (область I)}, \\ \lambda(r) &= \lambda_0 e^{\alpha(r-r_0)}, & r - r_0 \in [H, H_0] \text{ (область II)}\end{aligned}\quad (2.53)$$

где:  $\eta$  – коэффициент поглощения аэроионов, который характеризует уменьшение проводимости в области I за счет присутствия аэрозольных частиц (определение данного коэффициента будет рассмотрено ниже);

$r_0$  – 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:

$$\begin{aligned}\varphi_{r-r_0=0} &= 0, \\ \varphi_{|(r-r_0)=H_0} &= \varphi_\infty\end{aligned}\quad (2.54)$$

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 (2.53), уравнение (2.52) при  $r \gg \alpha^{-1}$  сводится к следующему:

$$\frac{d}{dr} \left( \lambda \frac{d\varphi}{dr} \right) = 0 \quad (2.55)$$

Интегрируя это уравнение по области I, получим:

$$\varphi_1(r) = -\frac{C_1}{\eta \alpha \lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} + C_2 \quad (2.56)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные.

Используя при  $r = r_0$  граничное условие  $\varphi(r_0) = 0$ , получим  $C_2 = \frac{C_1}{\eta\alpha\lambda_0}$  и для  $\varphi_1(r)$  имеем соотношение:

$$\varphi_1(r) = \frac{C_1}{\eta\alpha\lambda_0} (1 - e^{-\alpha(r-r_0)}) \quad (2.57)$$

Для второго решения в области II имеем:

$$\varphi_2(r) = -\frac{C_3}{\alpha\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} + C_4 \quad (2.58)$$

где  $C_3, C_4$  – постоянные.

Используя второе граничное условие в (2.54), получим для этого решения представление:

$$\varphi_2(r) = \varphi_\infty + \frac{C_3}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H_0} - e^{-\alpha(r-r_0)}) \quad (2.59)$$

Принимая потенциал электрического поля и плотность тока непрерывными при  $r - r_0 = H$ :

$$\begin{aligned} \varphi_1(H) &= \varphi_2(H) \\ j_1(H) &= j_2(H), \end{aligned} \quad (2.60)$$

$$j_1(H) = \lambda_1(H)E_{1r}(H) = j_2(H) = \lambda_2 E_{2r}(H)$$

где  $j_1, j_2$  – плотности электрического тока в областях I и II,  $E_{1r}E_{2r}$  – радиальные составляющие напряженности электрического поля в соответствующих областях.

Из второго уравнения системы (2.60) получим тождество:  $C_1 = C_3$ . Тогда из первого соотношения (2.60) получим выражение для  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{\varphi_\infty}{\left[ \frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha H}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]} \quad (2.61)$$

Подставляя данное соотношение в (2.58) и принимая во внимание соотношения (2.61), для радиальной составляющей напряженности электрического поля в области I получим:

$$\begin{aligned}
 E_{r1}(r) &= -\frac{C_1}{\eta\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} = \\
 &= -\frac{\varphi_\infty e^{-\alpha(r-r_0)}}{\eta\lambda_0 \left[ \frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha H}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]} = \\
 &= -\frac{\alpha\varphi_\infty e^{-\alpha(r-r_0)}}{1 - e^{-\alpha H} + \eta(e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0})}
 \end{aligned} \tag{2.62}$$

А в области II имеем:

$$\begin{aligned}
 E_{r2}(r) &= -\frac{C_1}{\lambda_0} e^{-\alpha(r-r_0)} = \\
 &= -\frac{\varphi_\infty}{\lambda_0 \left[ \frac{1}{\alpha\eta\lambda_0} (1 - e^{-\alpha}) + \frac{1}{\alpha\lambda_0} (e^{-\alpha H} - e^{-\alpha H_0}) \right]}
 \end{aligned} \tag{2.63}$$

Необходимо отметить, из работы [85], 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 [85, 86]:

$$E_{r1} = -\frac{\alpha\varphi_\infty}{\eta} e^{-\alpha(r-r_0)} \tag{2.64}$$

## 2.5. Связь электрической проводимости воздуха с концентрацией аэрозольных частиц

Уравнение, описывающее связь концентрации аэроионов с концентрацией аэрозольных частиц, в нестационарном случае имеет следующий вид:

$$\frac{dn_{\pm}}{dt} = q - \alpha n_{\pm}^2 - \beta N n_{\pm} \quad (2.70)$$

где  $n_{\pm}$  — концентрация положительных и отрицательных легких аэроионов;

$q$  — интенсивность ионообразования;

$N$  — концентрация аэрозольных частиц;

$\alpha$  — коэффициент рекомбинации положительных и отрицательных легких ионов;

$\beta$  — коэффициент присоединения легких ионов к аэрозольным частицам.

Связь полярных электрических проводимостей воздуха и концентрации аэроионов выглядит следующим образом:

$$\lambda_{\pm} = e b_{\pm} n_{\pm} \quad (2.71)$$

где  $\lambda_{\pm}$  — положительная и отрицательная электрическая проводимость воздуха;

$e$  — заряд электрона;

$b_{\pm}$  — подвижность положительных и отрицательных легких аэроионов.

Переходя к стационарному виду ( $d/dt = 0$ ), из выражений (2.70) и (2.71) получаем уравнение для концентрации аэрозольных частиц:

$$N = \frac{\alpha \lambda_{\pm}}{\beta e b} \left( \frac{q (e b_{\pm})^2}{\alpha \lambda_{\pm}^2} - 1 \right) \quad (2.72)$$

Более подробно влияние аэрозольных частиц рассмотрено в работе [88].

## 2.6. Определение коэффициента поглощения ионов $\eta$ .

Из работы [85] следует выражение для  $\eta$ :

$$\eta = \left( \frac{(\beta_i N)^2}{4 q \alpha} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\beta N}{2 \sqrt{q \alpha}} N, \quad (2.73)$$

где  $\beta_i$  –интегральный коэффициент присоединения легких ионов к аэрозольным частицам.

Вычислим эту величину, предполагая  $N = 10^9 \text{ м}^{-3}$ ,  $\beta = 1.6 \times 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ ,  $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $\alpha = 1.6 \times 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . В результате получим  $\eta = 0.82$ .

В случае, если учесть в выражении (2.73) зависимость  $\beta_{\pm}$  от типа ионов, то вместо этого выражения получим:

$$\eta = \left[ \left( \frac{(\beta_+ N)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\beta_+ N}{2\sqrt{q\alpha}} \right] + \left[ \left( \frac{(\beta_- N)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\beta_- N}{2\sqrt{q\alpha}} \right] \quad (2.74)$$

Это соотношение следует из уравнения (2.70), записанного для каждого типа ионов в стационарном случае [89]:

$$\begin{aligned} 0 &= q - \alpha n_+^2 - n_+ \sum_r \beta_+(r) N(r) \\ 0 &= q - \alpha n_-^2 - n_- \sum_r \beta_-(r) N(r) \end{aligned} \quad (2.75)$$

Решение этих уравнений определяет концентрацию положительных и отрицательных легких ионов в зависимости от концентрации аэрозольных частиц и более общее выражение для  $\eta$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \eta &= \left[ \left( \frac{\sum_r \beta_+(r) N(r)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\sum_r \beta_+(r) N(r)}{2\sqrt{q\alpha}} \right] + \\ &+ \left[ \left( \frac{\sum_r \beta_-(r) N(r)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\sum_r \beta_-(r) N(r)}{2\sqrt{q\alpha}} \right] \end{aligned} \quad (2.76)$$

В табл. 1 представлены результаты расчетов величины  $\eta$  в зависимости от концентрации аэрозольных частиц.

Таблица 2.5

Зависимость  $\eta$  от концентрации аэрозольных частиц

| $N (\text{м}^{-3})$ | $\eta$ |
|---------------------|--------|
| $10^9$              | 0,82   |
| $10^{10}$           | 0,21   |
| $5 \times 10^{10}$  | 0,021  |

Вычислим отношение

$$\frac{E_{r1}}{\beta\varphi_{\infty}} = \frac{1}{(1 - e^{-\beta(r_1 - r_0)}) + \eta e^{-\beta(r_1 - r_0)}} \quad (2.77)$$

в области  $[r_0, r_1]$  здесь величина  $\beta\varphi_{\infty}$  – абсолютная величина напряженности электрического поля в отсутствие аэрозоля;  $r_1$  – верхняя граница аэрозольного приземного слоя.

Таблица 2.6

Зависимость напряженности электрического поля от высоты верхней границы аэрозольного слоя для различных значений  $\eta$

| 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   |

Как видно из таблицы 2, с ростом концентрации аэрозольных частиц в приземном слое напряженность электрического поля растет. Величина  $\beta\varphi_{\infty}$  определяет напряженность электрического поля в отсутствие аэрозоля.

## Выводы к главе 2

Обзор теоретических работ показал, что почти все электрические процессы, протекающие во всех слоях атмосферы за исключением быстропеременных, описываются уравнениями Максвелла. За счет наличия различного рода генераторов электрического поля (в основном грозových), а также существования электрической проводимости воздуха поддерживается баланс токов, протекающих в атмосфере.

Помимо обзора работ, в главе представлена разработанная 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. При этом генераторы электрического поля, поддерживающие ГЭЦ, не учитываются, а входят через граничное условие на верхней границе ионосферы в виде задания величины потенциала ионосферы. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные теоретические вопросы влияния аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь в атмосфере являются достаточно актуальными при рассмотрении такого понятия как электроклимат и его вклада в климат Земли в целом.

2. Показано как влияют аэрозольные частицы в приземном слое атмосферы на радиальную составляющую напряженности электрического поля.

3. 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. Экспериментальные исследования временных вариаций ЭХА в арктических районах. Возможность выделения глобальной суточной вариации напряженности поля.

#### 3.1. Обоснование выбора станций для анализа

Все станции сети наблюдений за ЭХА можно условно разделить на 3 группы по особенностям географического расположения, а также по уровню антропогенной нагрузки на них [89, 90].

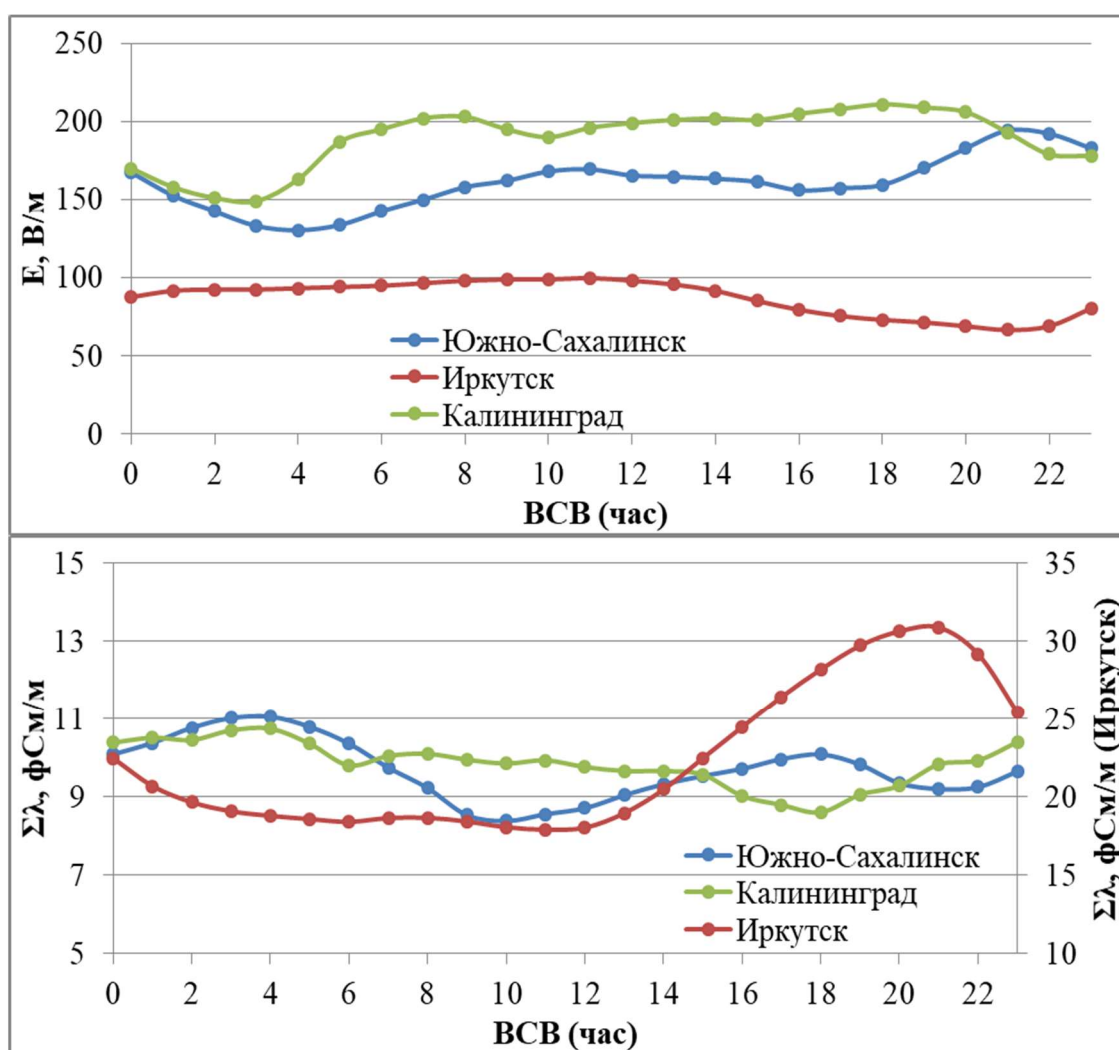


Рисунок 3.1 – Характерные суточные вариации  $E$  и  $\Sigma\lambda$  для городских станций.

**1. Городские станции.** Данная группа станций характеризуется повышенной чувствительностью к выбросам аэрозоля, что приводит к особенностям, как в сезонных вариациях, так и в суточных. На рисунке 3.1 представлены графики суточных вариаций для параметров, измеряемых на сети

станций наблюдения за ЭХА, где  $\sum \lambda = \lambda_+ + \lambda_-$  – суммарная электрическая проводимость воздуха. Из графиков видно, что суточный ход параметров никак не имеет выраженных повторений в привязке ко всемирно скоординированному времени, но заметна закономерность в локальном времени. Данную закономерность можно наблюдать в максимумах  $\sum \lambda$  и, соответствующих им, минимумах  $E$ . Так, например, 18-часовой полумаксимум  $\sum \lambda$  в Южно-Сахалинске, 20-часовой максимум в Иркутске и 3-часой максимум в Калининграде приходятся на период 4-5 часов локального времени, что соответствует самому минимальному автомобильному трафику. Минимумы же  $\sum \lambda$  и соответствующие максимумы  $E$  приходятся на часы пик.

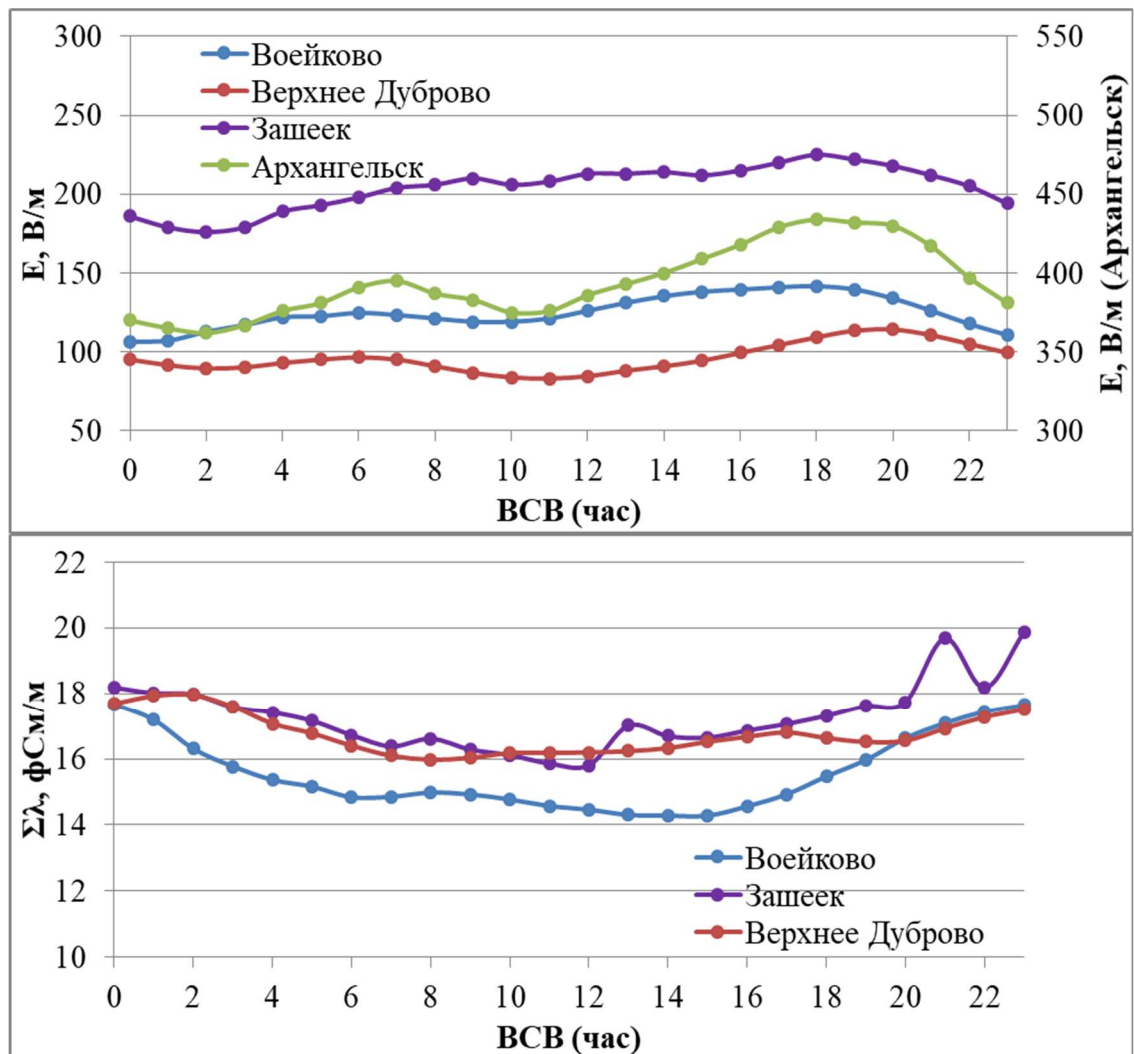


Рисунок 3.2 – Характерные суточные вариации  $E$  и  $\sum \lambda$  для внутриконтинентальных станций.

**2. Внутриконтинентальные станции.** На станциях данной группы заметно выражены суточные вариации, на которых прослеживаются, как глобальные процессы, так и местные изменчивости (рис. 3.2(б)). К глобальным эффектам относится 19-часовой максимум  $E$ , являющийся основным показателем наличия глобальной электрической токовой цепи в атмосфере. Местный же эффект обусловлен полумаксимумом, вызванным турбулентными процессами в приземном слое, возникающими в локальный полдень.

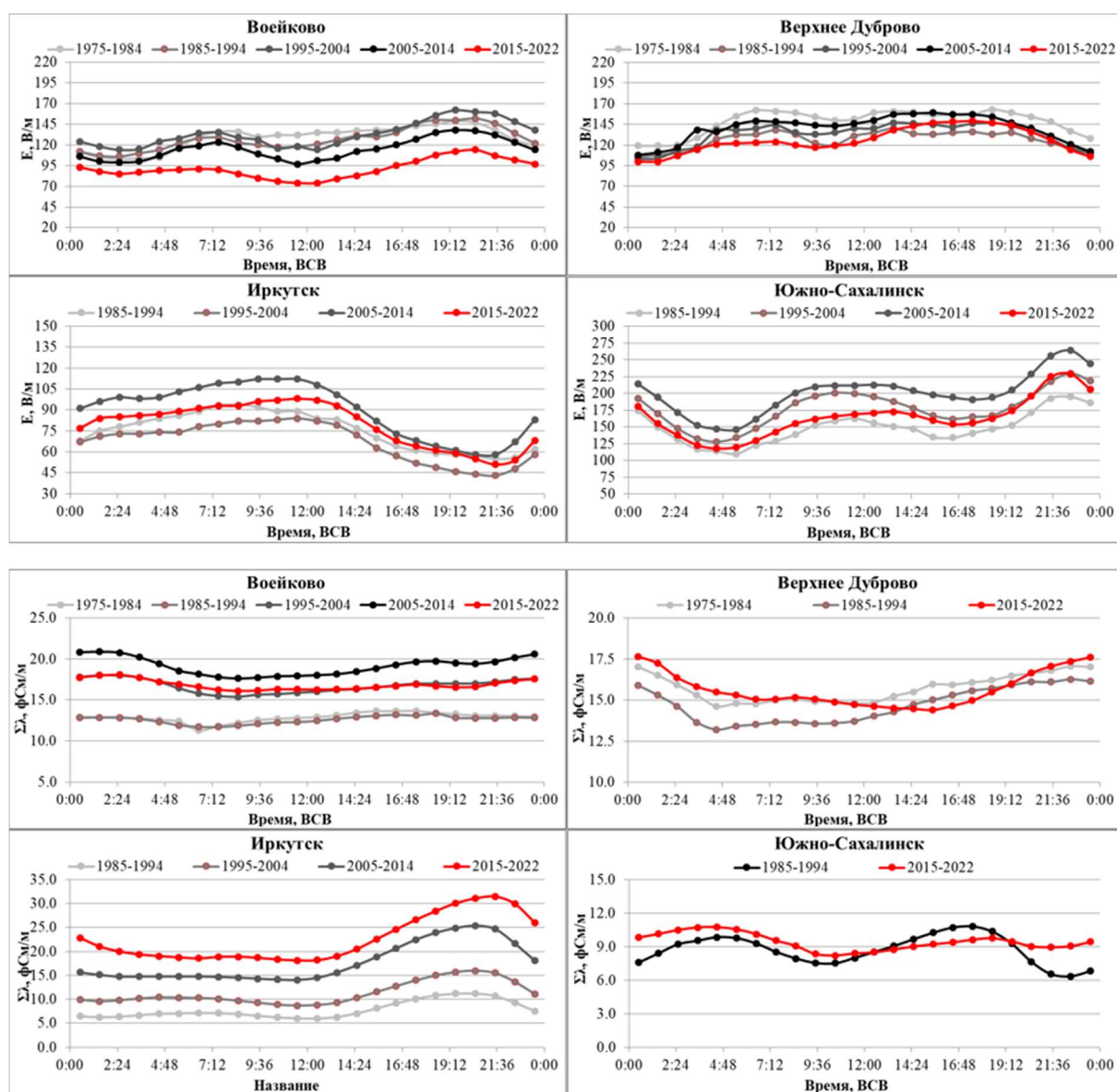


Рисунок 3.3 - Суточные вариации  $E$  и  $\Sigma\lambda$  на различных станциях сети в разные десятилетия.

Примечательно то, что на протяжении длительного времени, с момента начала наблюдений суточные вариации  $E$  и  $\Sigma\lambda$  на станциях с продолжительными

рядами наблюдения, входящих в обе рассмотренные группы практически не претерпели никаких изменений. Изменения коснулись лишь абсолютных значений. При этом объёмы выборки были достаточно репрезентативны. На рисунке 3.3 представлены графики суточных вариаций анализируемых параметров.

Из графиков видно, что на городских станциях (Иркутск, Южно-Сахалинск) унитарная вариация  $E$  не претерпела каких-либо значимых изменений. Это подтверждается и значениями коэффициентов корреляции ( $R$ ) между всеми периодами, которые составляют более 0,96 для Иркутска и более 0,92 для Южно-Сахалинска. Из графиков видно, что на городских станциях (Иркутск, Южно-Сахалинск) унитарная вариация  $E$  не претерпела каких-либо значимых изменений. Это подтверждается и значениями коэффициентов корреляции ( $R$ ) между всеми периодами, которые составляют более 0,96 для Иркутска и более 0,92 для Южно-Сахалинска.

Для станций Воейково и Верхнее Дуброво повторяемость суточного хода менее очевидна. В период 1975-1985 в Воейково наблюдалась унитарная вариация наиболее повторяющая кривую Карнеги с максимумом в 19 часов и минимумом в районе 2-4. В последующие годы унитарная вариация обрела вид более характерный для внутриконтинентальных равнинных районов, характеризующейся появлением утреннего полумакума, вызванного электродным эффектом. Данное различие также подтверждается слабыми и умеренными корреляционными связями между данным периодом и последующими после него ( $R \in [0,3-0,7]$ ).

На станции Верхнее Дуброво наоборот в предыдущие периоды наблюдалась вариация характерная для данной местности с утренним полумакумом вплоть до последнего периода, о чём также свидетельствуют высокие значения  $R > 0,75$ . В период же 2015-2022 данный полумакум «сгладился» и унитарная вариация стала более схожей с кривой Карнеги.

Анализ суточного хода значений  $\sum\lambda$  показал, что на станции Южно-Сахалинск вариация данного параметра стала более сглаженной, при этом, экстремумы колебаний не изменились за 30 лет.

На станции Верхнее Дуброво наоборот наблюдается трансформация суточного хода по сравнению с результатами наблюдений 30-40 летней давности. В данном случае видно смещение минимума значений с 4-х часов на 15. Стоит отметить, что значение коэффициента корреляции между периодами 1975-1984 и 1985-1994 составило 0,97, тогда как между этими периодами и 2015-2022 0,63 и 0,77 соответственно. Объяснением изменений в суточных ходах на обеих станциях может являться только то, что было изменено место установки. Для станции Верхнее Дуброво место установки было перенесено на новое здание метеостанции, а на станции Южно-Сахалинск изменения были введены для более удобного доступа к выносному блоку для проведения профилактических работ.

На станции Иркутск виден значительный скачок  $\sum\lambda$  в последнее десятилетие данного периода. Предположительным обоснованием этого феномена является то, что в 2008 году в окрестности метеостанции было начато строительство дорожной развязки, в ходе которого был снят большой пласт грунта, вследствие чего произошло увеличение эманации почвенного радона, что привело к росту  $\sum\lambda$ . Анализируемый временной отрезок (2015-2022) также обусловлен ростом  $\sum\lambda$ . При заметном росте абсолютных значений, суточная вариация  $\sum\lambda$  не претерпела никаких изменений, между всеми анализируемыми периодами наблюдаются высокие корреляционные связи ( $R>0,9$ ).

На станции Воейково визуально кажется, что вариации  $\sum\lambda$  для всех рассматриваемых периодов совпадают, но при детальном рассмотрении получаем, что суточный ход претерпел некоторые изменения. Так в отличие от периода 1975-1994, когда данный ход имел вид полуволны с минимумом в 6 часов и максимумом в 15, в последующие годы максимум сместился на 2 часа, а 15-ти часовой трансформировался в полумаксимум, а также возник минимум около 20 часов. Высокие повторяемости суточного хода ( $R>0,9$ ) наблюдались для двух десятилетних периодов внутри 1975-1994 и также для трех десятилетних

периодов внутри 1995-2022, это объясняется тем, что в 1996 пункт наблюдения был перенесён на новое место.

Объемы выборки, подтверждающие репрезентативность полученных графиков представлены в таблице 3.2. Сильное различие в количестве информации связано с тем, что для данных до 2014 года использовался архив, содержащий лишь среднечасовые значения ЭХА, тогда, как после 2014 анализировались минутные данные.

Таблица 3.2

Объем выборки проанализированной информации для каждой станции  
относящимся к городским и континентальным

| Станция         | Количество значений, тыс. шт. |                |           |                |
|-----------------|-------------------------------|----------------|-----------|----------------|
|                 | 1975-2014                     |                | 2015-2020 |                |
|                 | $E$                           | $\sum \lambda$ | $E$       | $\sum \lambda$ |
| Воейково        | 289                           | 276            | 2566      | 2294           |
| Верхнее Дуброво | 279                           | 150            | 1856      | 1879           |
| Иркутск         | 179                           | 185            | 2442      | 2856           |
| Южно-Сахалинск  | 170                           | 18             | 1604      | 1401           |
| Архангельск     | -                             | -              | 1925      | -              |
| Зашеек          | -                             | -              | 1318      | 338            |
| Калининград     | -                             | -              | 1414      | 771            |

К третьей группе относятся высокоширотные станции. Как говорилось в первой главе, влияние ГЭЦ на приземное электрическое поле хорошо проявляется в горных и полярных регионах, а также при измерениях у поверхностей океанов. При этом указывалось, что непрерывные наблюдения в условиях высоких широт проводятся независимо на станциях в Антарктиде (ст. Восток и Халли) и в обсерватории Хорзунд на архипелаге Шпицберген в Арктике [63].

Наблюдения за ЭХА в высоких широтах интересны тем, что эффекты различного рода, происходящие в ионосфере и приводящие к изменению ее проводящих свойств, а также разности потенциалов в ионосфере сильнее проявляется по направлению силовых магнитных линий, которые сконцентрированы на полюсах. Как следствие, данные изменения могут влиять на электрическое поле и проводимости в приземном слое [61]. Помимо этого, в данных регионах значительно снижено влияние локальных источников, вызванное преднамеренным и непреднамеренным антропогенными воздействиями.

В данной главе рассмотрены результаты наблюдений за  $E$  на 2-х станциях сети Росгидромета по наблюдению за ЭХА (гидрометеорологическая обсерватория (ГМО) «Тикси», объединенная гидрометеорологическая станция (ОГМС) Диксон) и организованной в период с 2017 по 2020 гг. станции «Ледовая база Мыс Баранова» и НИС «ЛБ мыс Баранова»). Последняя из перечисленных станций была организована для пилотных наблюдений совместно с ФГБУ «ААНИИ» параллельно с действующей сетью пунктов в Арктической зоне, как менее зависимой от локальных выбросов аэрозолей антропогенного происхождения и поэтому более информативной, и расположенной значительно севернее всех остальных на архипелаге Северная Земля [92]. Представленные станции входят в единую обобщенную сеть наблюдений, имеют общее методическое руководство и одинаковое измерительное оборудование [77].

### 3.2. Оборудование для проведения наблюдений

Для производства измерений на станциях, входящих в состав атмосферно-электрической сети «Росгидромета», используется, разработанный в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, атмосферно-электрический измерительный комплекс (АЭИК). Комплекс включает в себя измеритель напряженности электрического поля атмосферы и измеритель электрической проводимости воздуха, состоящие из выносных блоков (ВБ) устанавливаемых на улице и блоков питания и сопряжения (БПС) для размещения в помещении станции, а также дополнительное оборудование для обеспечения автоматизации

сбора и передачи данных наблюдений (рисунок 3.4). Оба измерителя, входящие в состав АЭИК занесены в Государственный реестр средств измерений (СИ), имеют свидетельства утверждения типа СИ и соответствующую методику поверки. Основные сведения об измерителях представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Сведения из документации на измерители «Поле-2М»  
и «Электропроводность-2М»

| Тип СИ                                     | №<br>свидетельства<br>утверждения<br>типа | Дата       | Регистрационный<br>номер | Методика<br>поверки   |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|
| Измеритель<br>«Поле-2М»                    | RU.C.34.001.A<br>№ 52463                  | 22.11.2013 | 55005-13                 | МП 2201-<br>0029-2013 |
| Измеритель<br>«Электропро-<br>водность-2М» | RU.C.34.002.A<br>№ 61992                  | 12.04.2016 | 63668-16                 | 651-15-42<br>МП       |

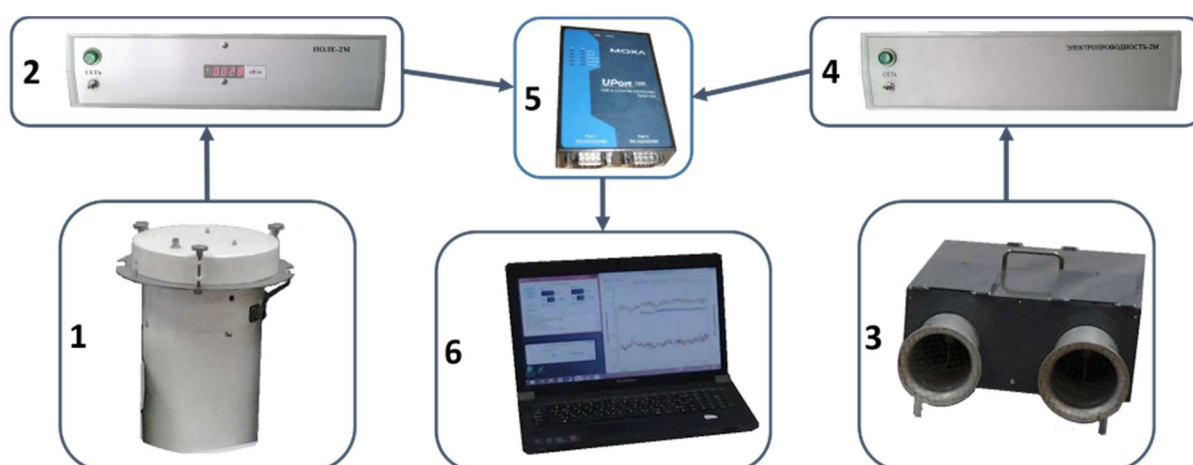


Рисунок 3.4 — Атмосферно-электрический измерительный комплекс АЭИК. 1 — ВБ измерителя "Поле-2М"; 2 — БПС измерителя "Поле-2М"; 3 — ВБ измерителя "Электропроводность-2М"; 4 — БПС измерителя "Электропроводность-2М"; 5 — преобразователь интерфейсов; 6 — персональный компьютер для регистрации результатов измерений.



Измеритель «Поле-2М» позволяет проводить автоматические измерения в непрерывном режиме, производя отсчет один раз в секунду. Конструктивно измеритель состоит из двух частей - выносного блока (ВБ) и блока преобразования сигнала (БПС), которые соединены между собой кабелями питания и передачи сигнала. Помимо этого, в комплект прибора входит контрольное устройство необходимое для проведения измерительного контроля. Устройство выполнено в виде насадки с расположенной в ней изолированной пластиной. На пластину попеременно подается «заземление» для корректировки «ноля» прибора и известное контрольное напряжение для контроля чувствительности.

Принцип действия измерителя основан на работе электростатического флюксметра, которая представляет из себя преобразование однородного электростатического поля в переменный электрический сигнал. На практике это реализовано следующим образом: на два измерительных электрода, выполненных в виде пластин, за счет вращающегося (с помощью электродвигателя) заземленного экрана, повторяющего форму электродов, модулируется внешнее электростатическое поле, путем попеременного открытия-закрытия электродов экраном. Напряжение на электродах изменяется с известной частотой от нуля (при закрытом электроде) до значения, пропорционального потенциалу данной точки (при открытом электроде).

В дальнейшем, переменное напряжение, индуцируемое на пластинах, усиливается аналоговым усилителем и передается на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), расположенного в БПС измерителя. Модуль АЦП осуществляет обработку сигнала, умножение его на калибровочные коэффициенты и дальнейшую демонстрацию, полученных значений  $E$  на индикаторе, а также передачу на внешнее регистрирующее устройство.

Стоит отметить определенную конструктивную особенность данного прибора, которая состоит в том, что измерительные пластины не защищены от попадания на них различного рода гидро- и литометеоров при их косом падении. Данная особенность не является помехой для выполнения основной задачи, а именно, фоновое мониторинга состояния окружающей среды, при этом служит

плюсом при измерении с более высоким частотным разрешением, поскольку позволяет улавливать искажения, вызванные отдельно взятыми частицами, попадающими на измерительные пластины.

В свою очередь, измеритель «Электропроводность-2м» также позволяет проводить отсчеты  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$  с дискретностью один раз в секунду. Конструктивно ВБ измерителя представляет из себя блок из двух аспирационно-измерительных цилиндрических конденсаторов (АИК), на внешние обкладки которых подается напряжение  $\pm 60$  В для каждой своей полярности. В основе принципа измерения  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$ , легло определение тока ионов на собирающем (центральном) электроде при заданных значениях расхода воздуха, и емкости АИК.

Передача данных наблюдения происходит один раз в пять минут средствами ведомственной сети связи (ВСС «Росгидромета»). Данные поступают на тематический сервер «Атмосферное электричество» один раз в 5 минут. Каждая запись на сервере содержит следующую информацию: координатный индекс станции, дату и время измерения, среднее значение за минуту ( $E_{cp}, \sum \lambda_{cp}$ ), максимальное значение за минуту ( $E_{max}, \sum \lambda_{max}$ ) и минимальное значение за минуту ( $E_{min}, \sum \lambda_{min}$ ).

Отметим, что подтверждением корректной работы измерительного оборудования служат графики, представленные на рисунке 3.3, которые имеют высокие значения между различными десятилетиями.

### 3.3. Условия проведения наблюдений

Измерения ЭХА проводятся в российском Заполярье на широтах выше 70-й параллели. Станции наблюдения расположены в вершинах криволинейного треугольника со сторонами от 1000 до 1200 м. Две из рассматриваемых станций входят в состав сети мониторинга электрического состояния атмосферы Росгидромета, В период с 2017 по 2020 гг. параллельно с действующей сетью пунктов в Арктической зоне, как менее зависимой от локальных выбросов аэрозолей антропогенного происхождения и поэтому более информативной, совместно с ФГБУ «ААНИИ» были организованы пилотные измерения

электрических характеристик атмосферы на пункте «Ледовая база Мыс Баранова» (архипелаг Северная Земля). На рисунке 3.5 представлена карта пунктов данной сети, красным пунктиром обозначен Северный Полярный круг.



Рисунок 3.5 – Карта пунктов наблюдения за ЭХА.

Стоит отметить, что помимо анализируемых пунктов, в состав сети также входит высокоширотная станция Зашеек, но информация, получаемая с этого пункта, не рассматриваются в работе, поскольку станция отличается географическими особенностями своего расположения. Станция находится в глубине материка, посреди поселка с преимущественно печным отоплением, продукты горения от которого могут влиять на результаты наблюдений. Помимо этого, Зашеек расположен вблизи от крупного промышленного объекта, в 7 км от Кольской АЭС. Основные характеристики пунктов наблюдения представлены в таблице 3.3.

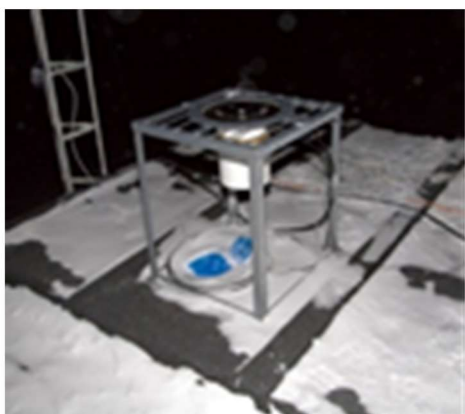
В таблице показано, что расположения ВБ «Поле-2М» на станциях Тикси и мыс Баранова идентичны друг другу по высоте установки. Помимо этого, сами модули, на которых установлены ВБ схожи по размерам, а также близлежащие окрестности станций имеют схожие рельеф местности и постройки, что может свидетельствовать о схожих искажениях векторов электрического поля. В отличие

от них, здание метеостанции Диксон, на крыше которого установлен ВБ измерителя, имеет иные геометрические размеры и форму. Также стоит учитывать расположение станции, которая находится вблизи обрыва высотой около 10 м, что может сильно повлиять на данные искажение. На рисунке 3.6 представлены фотографии мест установки ВБ измерителей «Поле-2М».

а)



б)



в)



Рисунок 3.6 – Установка выносных блоков измерителей «Поле-2М» и «Электропроводность-2М» на:

а) ГМО Тикси; б) НИС «ЛБ мыс Баранова»; в) ОГМС Диксон.

Таблица 3.3

## Основные географические характеристики анализируемых станций

| Название станции | Регион                                   | Долгота | Широта | Высота над уровнем моря | Высота установки измерителей |
|------------------|------------------------------------------|---------|--------|-------------------------|------------------------------|
| Тикси            | Республика Саха (Якутия)                 | 128,9   | 71,6   | 3                       | 5                            |
| о. Диксон        | п-ов Таймыр (Красноярский край)          | 80,5    | 73,5   | 10                      | 8                            |
| м. _Баранова     | арх-г Северная Земля (Красноярский край) | 79,2    | 101,5  | 6                       | 5                            |

3.4. Обоснование критериев создания выборки

Как говорилось ранее, согласно существующим представлениям, вариации параметров глобальной электрической цепи могут проявляться, в том числе, в изменении напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы, синхронном по всему земному шару. Суточный ход  $E$  имеет вид простой полуволны с максимумом в 19 часов по всемирному скоординированному времени. При этом, выделение унитарной вариации  $E$  на материковых станциях представляется достаточно сложным, так как здесь большое влияние оказывают локальные генераторы электрического поля, в первую очередь электрически заряженные частицы аэрозоля, а также локальные процессы ионизации атмосферы, связанные с выходом из почвы радиоактивных газов [93].

Помимо вышеозначенного значительное влияние на вариации  $E$  оказывают различного рода метеорологические явления такие как: осадки,

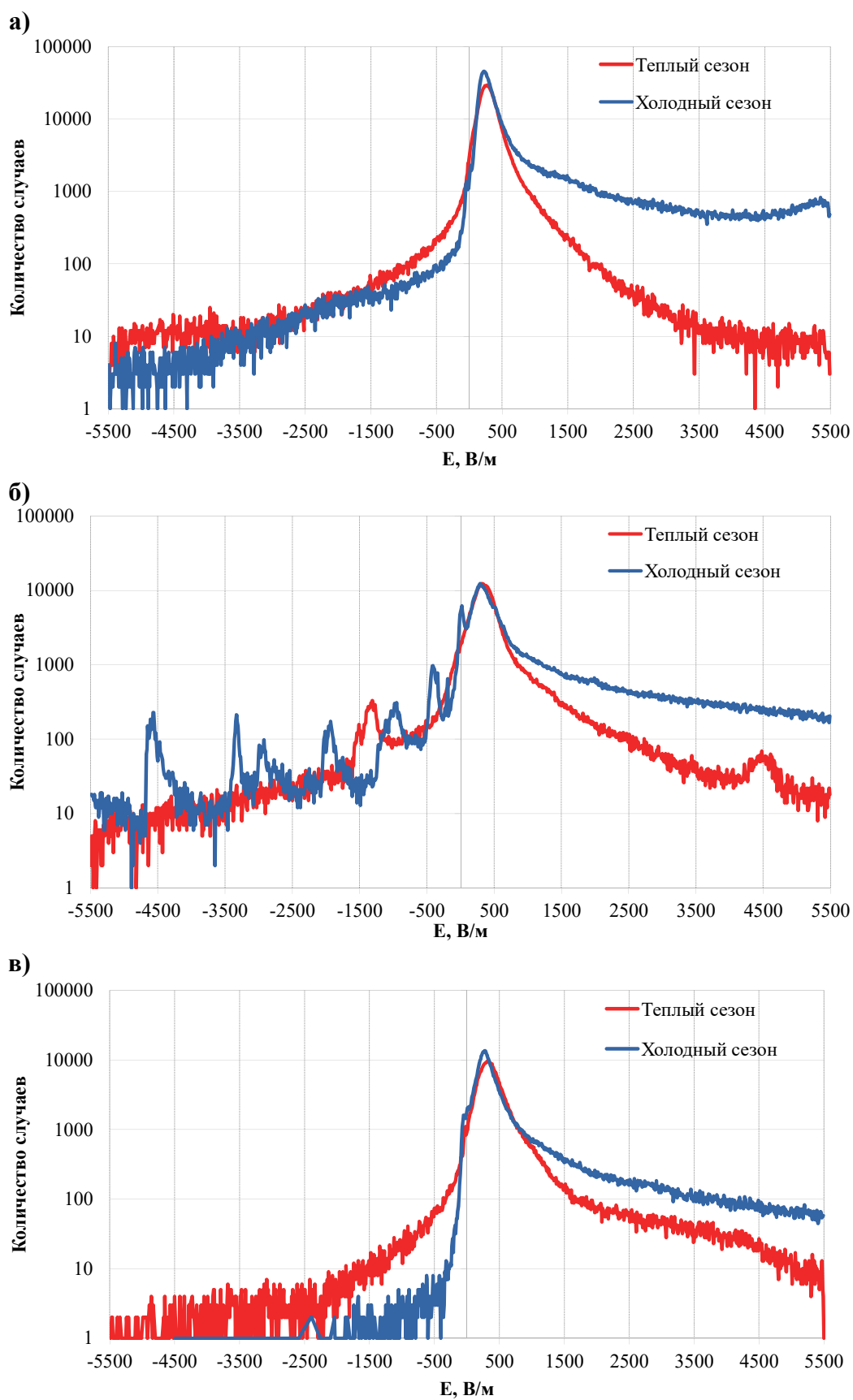


Рисунок 3.7 – Графики распределения  $E$  в зависимости для разных сезонов:

а – ГМО Тикси; б – ОГМС Диксон; в – НИС «ЛБ мыс Баранова»



сопровождающиеся появлением в воздухе электрически заряженных частиц снега и льда, метели и т.п. Перечисленные метеоявления зачастую несут положительны заряд, который приводит к увеличению напряженности электрического поля выше шкалы регистрации измерителя «Поле-2М».

На рисунке 3.7 представлены графики распределения значений  $E$  для каждой станции отдельно для теплого и холодного периодов года. Для оценки повторяемости значения  $E$  объединялись по интервалам шириной 10 В/м. Для удобства отображения вертикальная шкала на графике построена в логарифмическом масштабе. Поскольку в высоких широтах достаточно сложно выделять времена года за теплый сезон принимался период с мая по сентябрь, за холодный, соответственно, с октября по апрель [94].

Как следует из рисунка, в течение всего года максимальную повторяемость имеют значения  $E$  находящиеся в рамках от 0 до 1000 В/м. На данный интервал приходится 83%, 74% и 84% от всех случаев соответственно для Тикси, Диксона и м. Баранова. В холодный период значения  $E$ , превышающие 1000 В/м, отмечаются от 15% на м. Баранова до 26% Диксоне, а  $E$ , меньше 0 В/м не превышают 10% случаев.

На теплый же период доля случаев, когда значения  $E$  были выше 1000 В/м или ниже 0 В/м, не превышают 10% для каждого интервала. Отсюда можно сделать вывод, что периоды действия метелей и снегопадов на станциях Диксон и Тикси в холодный период года достаточно продолжительны, и интенсивность электрических возмущений атмосферы при этом столь высока, что это оказывает влияние на распределение статистических параметров  $E$ . Стоит также отметить появление на станции Диксон локальных максимумов в холодный период года. Анализ данных случаев показал наличие длительных снегопадов, характеризующихся подобными значениями.

В таблице 3.4 приведено количество минут, на которые приходится проявление тех или иных явлений погоды, зафиксированных наблюдателем на метеостанции. В первом столбце представлен номер явления в коде ПЕРСОНА-МИС [95]. Анализ проводился за 5 лет непрерывных наблюдений с

2014 по 2019 годы включительно. В данный период присутствовали простои измерительного оборудования, вызванные ремонтом, профилактикой, а также пропуски наблюдений ввиду некорректной работы.

Таблица 3.4

Объем выборки минутных значений  $E$  для каждого метеорологического явления

| Код явления | Наименование явления                 | Количество случаев, станция Тикси | Количество случаев, станция Диксон |
|-------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 0           | Нет явлений                          | 475293                            | 574236                             |
| 10          | Роса                                 | 3275                              | 240                                |
| 11          | Иней                                 | 108425                            | 47976                              |
| 12          | Гололед                              | 1424                              | 2711                               |
| 13          | Изморозь кристаллическая             | 103459                            | 87453                              |
| 14          | Изморозь зернистая                   | 3960                              | 760                                |
| 21          | Дымка                                | 26787                             | 58289                              |
| 22          | Туман                                | 9516                              | 36963                              |
| 23          | Туман просвечивающий                 | 4427                              | 2357                               |
| 24          | Туман поземный                       | 560                               | -                                  |
| 28          | Туман в окрестности станции          | 320                               | -                                  |
| 29          | Туман поземный в окрестности станции | 327                               | -                                  |
| 31          | Мгла                                 | 1771                              | -                                  |
| 40          | Мгла снежная                         | -                                 | 100                                |
| 41          | Поземок                              | 178948                            | 225263                             |



|    |                      |        |        |
|----|----------------------|--------|--------|
| 42 | Метель низовая       | 48612  | 102032 |
| 44 | Метель общая         | 5093   | 31172  |
| 50 | Иглы ледяные         | 10621  | 1325   |
| 51 | Ледяной дождь        | -      | 271    |
| 53 | Крупа снежная        | 1146   | 36     |
| 54 | Зерна снежные        | 32871  | -      |
| 62 | Морось               | 32820  | 3975   |
| 63 | Дождь                | 65971  | 16088  |
| 64 | Дождь ливневый       | 11976  | 21321  |
| 70 | Снег                 | 443942 | 101601 |
| 71 | Снег ливневый        | 22162  | 93756  |
| 72 | Снег мокрый          | 4865   | 2277   |
| 73 | Снег ливневый мокрый | 4671   | 11818  |
| 80 | Гроза                | 483    | 141    |
| 82 | Полярное сияние      | 48631  | 10008  |

В настоящее время принято считать, что унитарная вариация наиболее четко прослеживается в часы так называемой «хорошей погоды». Подобные погодные условия характеризуются отсутствием грозы, выпадающих осадков, инея, изморози, тумана, сильной и умеренной мглы и дымки (видимость больше 4 км), нижней облачности, в особенности кучевой (общая облачность не более 3 баллов), а также отсутствием метелей, поземки, пыльного ветра и ветра превышающего 6 м/с.

Стоит отметить, что большинство из вышеперечисленных условий вносят значительный вклад в вариации  $E$  только во внутриконтинентальных районах

средних и низких широт. Так, например в работе [85] приведены теоретические оценки влияния аэрозольных частиц, к которым, в свою очередь, относятся и облачные слои, на значения  $E$ , которые довольно малы и приводят к её увеличению на 8-10%. В работе [96] теоретически и практически показано, что скорость ветра влияет на смещение вечернего максимума унитарной вариации  $E$ . Помимо этого, в работе [53] на основе данных многолетних наблюдений на станции Воейково статистически обосновано, что далеко не все метеорологические явления, оказывают весомое воздействие на вариации  $E$ .

Учитывая вышеописанные особенности, при обработке данных наблюдений использовалась информация об ЭХА в так называемые «спокойные часы», которые частично удовлетворяют условиям «хорошей погоды», а именно, исключают влияние метеорологических явлений на флуктуации приземного электричества. Спокойные часы являются показателем фоновое состояние и ежегодно публикуются в отчетах о состоянии окружающей среды Российской Федерации [97–100].

В связи с вышесказанным представляется необходимым создание статистически обоснованных критериев выборки, удовлетворяющих условиям спокойных часов. Как было сказано выше, данные наблюдений за напряжённостью электрического поля приземного слоя атмосферы поступают на сервер в ГГО осреднёнными ( $E_{cp}$ ) за минуту. Кроме средних значений, также поступают максимальные ( $E_{max}$ ) и минимальные ( $E_{min}$ ) значения за данную минуту, что позволяет ввести величину  $\Delta E = E_{max} - E_{min}$ , характеризующую максимальный минутный «шум» как приборного характера, так и вызванный внешними факторами, такими, как попадание гидро- и литометеоров на экранирующую или измерительные пластины измерителя «Поле-2М», а также сильными порывами ветра, приносящими объёмный заряд.

В работе [53] предложено обоснование статистически значимых процентилей для вариационного ряда  $E_{cp}$ , которые равны 5% и 95%. На рисунке представлены диаграммы распределения  $E_{cp}$  в зависимости от разных метеоявлений в форме «ящичков-с-усами» для Тикси и Диксона, соответственно (а) и (б). Верхняя и

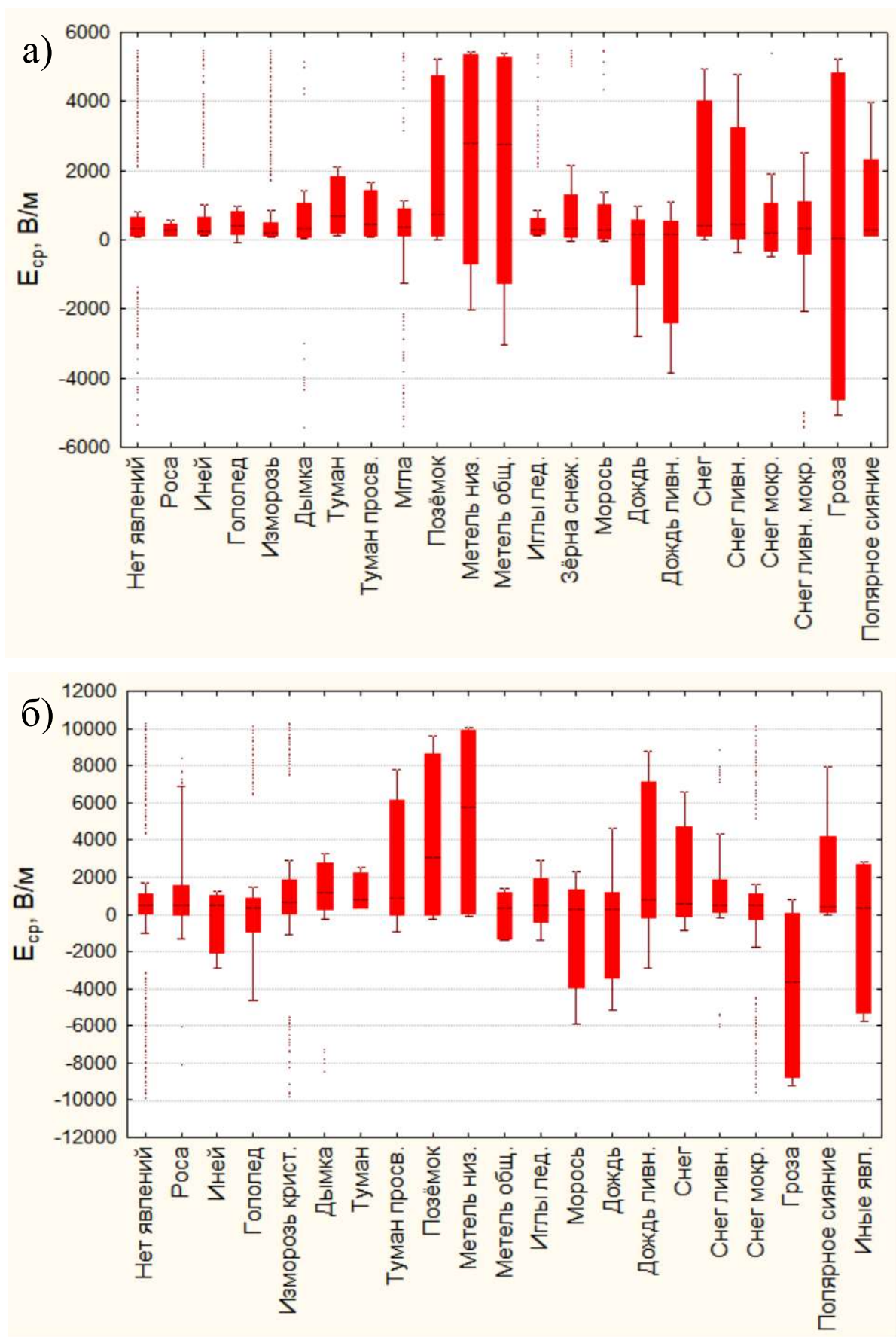


Рисунок 3.8 – Статистическое распределение  $E_{cp}$  для ГМО Тикси (а) и ОГМС Диксон (б) при различных метеорологических явлениях

нижняя границы «ящиков» соответствуют  $E_{5\%}$  и  $E_{95\%}$ , «усы»  $E_{2\%}$  и  $E_{98\%}$ , соответственно, линиями внутри ящиков обозначены медианные значения, точками – экстремальные значения [101].

Поскольку количество случаев по некоторым явлениям на станции Диксон достаточно мало, было принято решение их объединения. Таким образом, в колонку «Иные явл.» были объединены роса, мгла снежная, ледяной дождь и крупа снежная. Для станции Тикси были объединены между собой схожие явления: туман и туман в окрестностях станции; туман просвечивающий, туман поземный, туман поземный в окрестностях станции; крупа снежная, зёрна снежные. Также, для обеих станций были объединены изморозь кристаллическая и изморозь зернистая.

Из диаграмм видно, что наибольший разброс  $E_{cp}$  приходится на такие явления, как метели обеих классификаций и грозы. Чуть в меньшей степени на данные параметры влияют туман и осадки, как жидкие, так и твёрдые. В наименьшей степени  $E_{cp}$  отклоняется от значений, характерных для отсутствия метеоявлений, при росе, инее, гололёде, ледяных иглах и полярном сиянии. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными для станции Воейково [53], различие составляют лишь абсолютные значения, которые возникают в связи с различием установки выносных блоков измерителей «Поле-2М», а также с орографическими особенностями местности.

Оценка  $\Delta E$  проводилась на основе эмпирических методов. Таким образом, нижнее значение  $\Delta E_{min}$  не может быть меньше паспортных значений прибора, которые составляют  $\pm 3$  В/м для идеальных условий. В условиях реальной атмосферы данное значение не опускается ниже  $\pm 5$  В/м, как следствие,  $\Delta E_{min} = 10$  В/м для обеих исследуемых станций. Для верхнего предела ( $\Delta E_{max}$ ), как показывает практика, в условиях невозмущенной атмосферы разброс значений лежит в пределах  $\pm 10\%$ .

В таблице 3.5 указаны значения  $E_{cp}$  для описанных ранее значимых процентилей и медианные значения.

Таблица 3.5

Значения  $E_{cp}$ , для различных процентилей [101]

| Станция | $E_{2\%}$ , В/м | $E_{5\%}$ , В/м | Медиана | $E_{95\%}$ , В/м | $E_{98\%}$ , В/м |
|---------|-----------------|-----------------|---------|------------------|------------------|
| Тикси   | 89              | 138             | 307     | 634              | 821              |
| Диксон  | -991            | 42              | 492     | 1096             | 1724             |

Стоит отметить большой разброс значений  $E_{cp}$  в обе стороны для станции Диксон, что не наблюдается в Тикси. Возможно, данная особенность связана с несколько неточным временем фиксации метеоявлений, которые, в свою очередь, успевают внести вклад в возмущение электрического поля.

Данные о метеорологических явлениях на станции мыс Баранова отсутствуют, но, учитывая, как говорилось ранее, схожесть со станцией Тикси в части расположения выносных блоков, окружающей территории, а также процентного распределения значений в различные сезоны, для создания выборки можно воспользоваться критериями, полученными в Тикси.

По итогу проведённого анализа, полученные значения для  $E_{5\%}$  и  $E_{95\%}$  были округлены до ближайшего десятка. На основе вышеизложенного, рассчитаны  $\Delta E$ , и, как следствие, критерии для исследуемых параметров, характеризующие «нормальные часы» при введении которых большинство значений  $E$  в периоды действия метеоявлений оказывающих наибольшую роль на отклонение данного параметра будут отфильтровываться, для станций Тикси и мыс Баранова лежат в следующих пределах:

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

для станции Диксон:

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

### 3.5. Проверка полученных критериев

Для проверки полученных критериев были рассчитаны среднечасовые значения  $E_{cp}$  с учётом данных критериев, а также среднечасовые в условиях отсутствия метеоявлений. Помимо этого, как говорилось ранее, за счёт одинаковой установки измерителей «Поле-2М» на станциях Тикси и мыс Баранова, критерии выборки для обеих станций в грубом приближении могут быть близки. В связи с этим, были также рассчитаны среднечасовые значения для станции мыс Баранова с учётом критериев, полученных для Тикси. Результаты представлены в виде графиков на рисунке 3.9.

Из графиков видно, что на обеих станциях для результатов выборок в нормальные часы амплитуда получаемой вариации примерно в два раза больше, чем для вариации, полученной при введении критериев. Средние значения  $E$  на станции Тикси выше для нормальных часов, тогда как на станции Диксон средние значения для обеих выборок совпадают. Средние, максимальные ( $max$ ), и минимальные ( $min$ ) величины  $E$ , а также коэффициенты корреляции ( $R$ ) между видами выборок для анализируемых станций представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Основные значения  $E$  для суточных вариаций.

| Станция     | Вид выборки  | Среднее,<br>В/м | max, В/м | min, В/м | R    |
|-------------|--------------|-----------------|----------|----------|------|
| Тикси       | Норм. часы   | 337             | 384      | 308      | 0,77 |
|             | По критериям | 316             | 342      | 296      |      |
| Диксон      | Норм. часы   | 532             | 635      | 458      | 0,94 |
|             | По критериям | 532             | 576      | 502      |      |
| м. Баранова | По критериям | 332             | 366      | 306      |      |

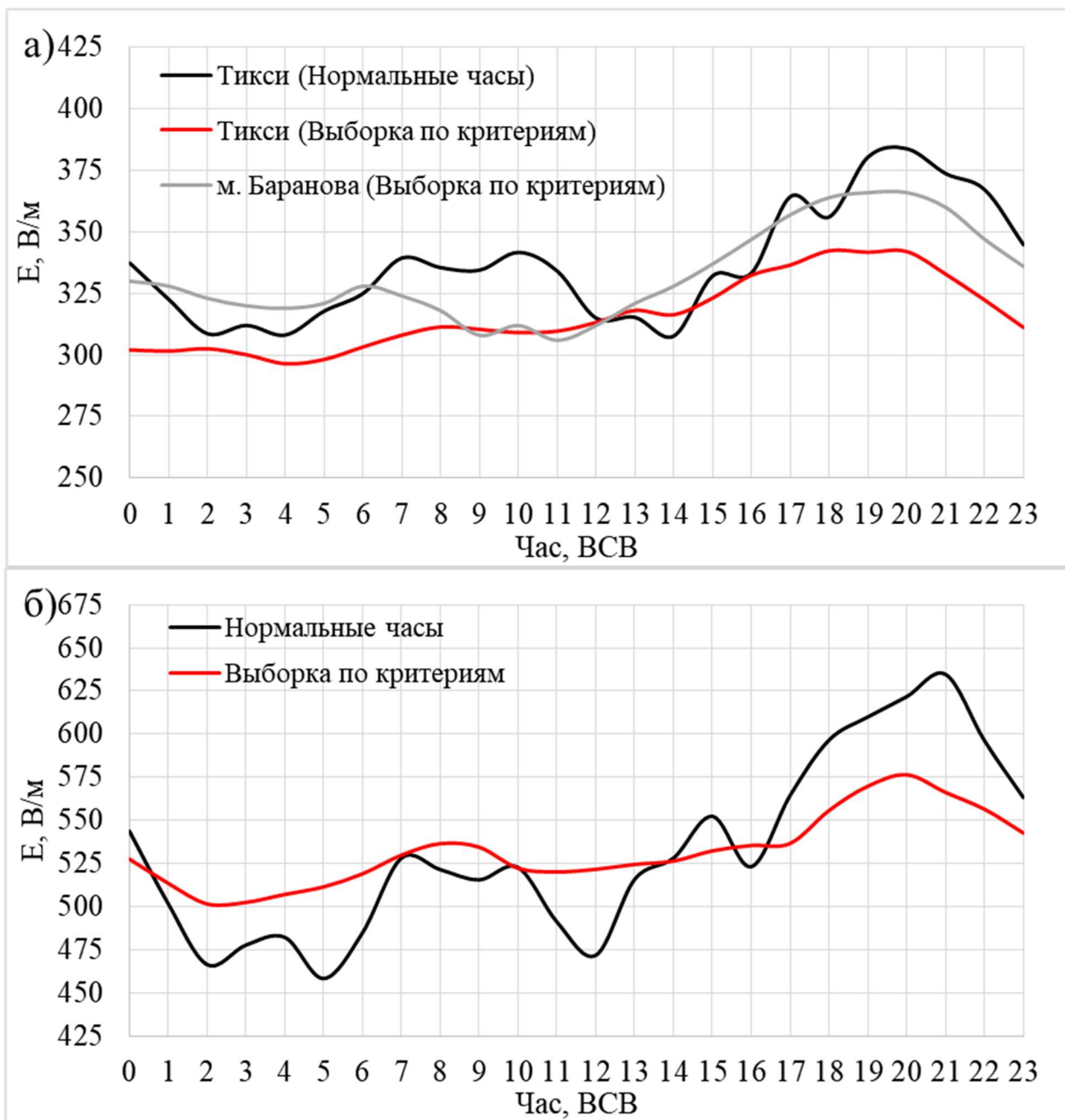


Рисунок 3.9 – Сравнение результатов выборок значений  $E$  для нормальных часов и с применением критериев выборки: а) ГМО Тикси и НИС «ЛБ мыс Баранова»; б) ОГМС Диксон.

Помимо прочего на графиках показано, что вариации при нормальных часах имеют несколько локальных максимумов и минимумов, тогда как при применении критериев выборки суточная вариация более плавная. При этом во всех случаях, включая мыс Баранова, наблюдается унитарная вариация, которая является

основным показателем наличия глобальной электрической цепи в атмосфере [2]. Стоит отметить, что значения  $R$  показали высокую (Тикси) и очень высокую (Диксон) корреляционные связи.

В таблице 3.7 приведено количество событий и процент попаданий в результаты выборки значений  $E$  при различных метеоявлениях. Из таблицы видно, что количество случаев, удовлетворяющих критериям, почти в 2 раза больше, чем случаев в нормальные часы. Более чем 80% случаев при нормальных условиях попадают в выборку по критериям. Критерии практически исключают периоды прохождения метелей и гроз, но при этом допускают большой процент различных рода осадков.

Таблица 3.7

Оценка попадания в результаты выборки данных при различных метеоявлениях [101].

| Наименование явления | Тикси                 |                    | Диксон                |                    |
|----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
|                      | Количество совпадений | Процент совпадений | Количество совпадений | Процент совпадений |
| Нет явлений          | 381362                | 80.2               | 478980                | 83.4               |
| Роса                 | 1883                  | 57.5               | -                     | -                  |
| Иней                 | 74075                 | 68.3               | 22891                 | 47.7               |
| Гололед              | 879                   | 61.7               | 2190                  | 80.8               |
| Изморозь             | 60029                 | 55.9               | 48192                 | 54.6               |
| Дымка                | 14414                 | 53.8               | 40323                 | 69.2               |
| Туман                | 3411                  | 33.9               | 15076                 | 40.8               |
| Туман просв.         | 2166                  | 42.7               | 1503                  | 63.8               |
| Мгла                 | 1055                  | 59.6               | -                     | -                  |
| Позёмок              | 55565                 | 31.1               | 98896                 | 43.9               |



|                  |        |      |       |      |
|------------------|--------|------|-------|------|
| Метель низовая   | 700    | 1.4  | 5480  | 5.4  |
| Метель общая     | 0      | 0.0  | 321   | 1.0  |
| Иглы ледяные     | 6928   | 65.2 | 622   | 46.9 |
| Зёрна снежные    | 19921  | 58.6 | -     | -    |
| Морось           | 15705  | 47.9 | 3033  | 76.3 |
| Дождь            | 24428  | 37.0 | 8335  | 51.8 |
| Дождь ливневой   | 4838   | 40.4 | 11732 | 55.0 |
| Снег             | 204069 | 46.0 | 38177 | 37.6 |
| Снег ливневой    | 8951   | 40.4 | 55136 | 58.8 |
| Снег мокрый      | 2376   | 48.8 | 1879  | 82.5 |
| Снег ливн. мокр. | 2502   | 53.6 | 10006 | 84.7 |
| Гроза            | 24     | 5.0  | 1     | 0.7  |
| Полярное сияние  | 28472  | 58.5 | 5222  | 52.2 |
| Иные явления     | -      | -    | 267   | 35.7 |

### Выводы к главе 3

Длительность непрерывных рядов сетевых наблюдений за ЭХА на различных станциях, как показано в первой главе, достигает более чем 60 лет. Обработка результатов наблюдений на большинстве станций показала, что выделение глобальной суточной вариации  $E$  достаточно сложно и требует учета множества различных факторов.

На станциях, относящихся к урбанизированной среде, где антропогенное влияние наиболее велико, определение данной вариации и вовсе невозможно ввиду влияния на нее процессов жизнедеятельности человека. На станциях, относящихся к внутриконтинентальному типу, суточная вариация  $E$  более близка к кривой Карнеги, чем в городе, но также имеет ряд особенностей. Так, ввиду электродного эффекта в утренние часы возникает полумаксимум, связанный со сменой дня и ночи.

Для станций, расположенных на малообжитых территориях прибрежных регионов Северного Ледовитого океана, все перечисленные выше эффекты влияния на ЭХА действуют в наименьшей степени. Почти полное отсутствие какого-либо локального антропогенного воздействия делает эти регионы наиболее чистыми, а смена дня и ночи имеет сезонный характер против суточного в средних широтах. Таким образом, проявление эффектов ГЭЦ в полярных регионах наиболее заметно.

Важным элементом сетевого мониторинга абсолютно любых характеристик, это обеспечение единства измерений. На созданной сети наблюдения за ЭХА данное единство обеспечивается единым измерительным оборудованием, имеющим метрологическую базу, а также проведением наблюдений по единой утвержденной методике.

В рамках данной главы также был проведен статистический анализ пятилетнего массива минутных данных о напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы с двух станций полярного региона Российской Федерации, а также сопутствующая информация о метеорологических явлениях.

Результаты сопоставимы с аналогичными работами, проводимыми на других станциях.

По результатам анализа получены статистически значимые критерии фильтрации данных наблюдений для  $E_{cp}$  и  $\Delta E$  в условиях отсутствия метеоявлений. Сопоставление результатов применения критериев с данными в отсутствии метеоявлений показало достаточную схожесть получаемых суточных вариаций. Также, стоит учесть, что применение критериев почти полностью исключают периоды действия наиболее влияющих на вариации ЭХА явлений.

Помимо прочего полученные критерии показали возможность их применения в оперативной практике для автоматизации обработки поступающей информации об атмосферно-электрических характеристиках, а также ее контроля на рассматриваемых станциях.

Таким образом, по итогу главы можно заключить, что в полярных регионах проявление отклика вариации ионосферного потенциала на  $E$  в приземном слое, как основного показателя наличия глобальной электрической цепи в атмосфере наиболее выражены. При этом, для выделения унитарной вариации при длительных наблюдениях не требуется введения общепринятых критериев «хорошей погоды», а достаточно лишь исключить из выборки данные наблюдений в период наиболее опасных метеоявлений. А также, как показано, не имея метеорологической информации, можно применить фильтрацию данных со станции с аналогичными условиями установки измерительного оборудования.

## 4. Влияние аэрозольных частиц субмикронного диапазона на локальные проявления элементов глобальной электрической цепи

### 4.1. Понятие атмосферного аэрозоля

Аэрозоли - это жидкие или твердые частицы, взвешенные в газе. Аэрозоли в атмосфере могут иметь как природные, так и антропогенные источники. К природным источникам можно отнести туман, пыль, морскую соль, вулканические выбросы, а также аэрозоли биологического происхождения, такие как пыльца растений, мельчайшие живые организмы и т.д. К аэрозолям же антропогенного происхождения, в основном относят различные промышленные выбросы, продукты горения различного вида топлива, различные взвеси, образующиеся при добыче полезных ископаемых открытым способом и т.д. [102].

Помимо загрязнения воздуха и воздействия на здоровье, атмосферные аэрозоли являются важным фактором воздействия на климат, особенно в отношении радиационного баланса атмосферы. В дополнение к рассеянию света в атмосфере, как в случае тумана или смога, они могут непосредственно рассеивать солнечное излучение обратно в космос и, следовательно, вызывать радиационное охлаждение (прямой аэрозольный эффект). Кроме того, аэрозоли могут действовать как ядра конденсации, приводящие к образованию облаков. При этом, излучающие свойства облаков зависят от количества и типа аэрозоля (косвенный аэрозольный эффект) [103].

Атмосферно электрические характеристики, такие как напряженность электрического поля атмосферы и электрическая проводимость воздуха, являются интегральными показателями как радиоактивного, так и аэрозольного загрязнения. В ряде работ [1, 47, 102] теоретически и экспериментально обосновано влияние аэрозольных частиц субмикронного диапазона на вариации ЭХА. Также в работах [85–87] показан возможный вклад областей, покрытых аэрозольным слоем в глобальное сопротивление атмосферы и, как в следствие, в потенциал ионосферы в целом.

В данной главе будут рассмотрены теоретические модели влияния атмосферного аэрозоля в диапазоне от 15 нм до 800 нм на ЭХА, а также результаты непрерывных многолетних наблюдений за концентрацией аэрозоля на станции Тикси и его вклад в вариации параметров приземного электричества.

#### 4.2. Описание эксперимента

В период с 2010 по 2018 год в рамках партнерства между Национальным научным фондом (NSF), Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA), Финским метеорологическим институтом и Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Росгидромет) и на станции Тикси были организованы непрерывные комплексные исследования атмосферы. Наблюдения проводились в «Павильоне чистого воздуха» (ПЧВ), расположенном в 1,5 км северо-восточнее метеостанции. На рисунке 4.1 приведена карта расположения ПЧВ относительно метеостанции. Помимо прочего наблюдения велись за концентрацией аэрозольных частиц различными приборами в различном диапазоне размеров. В таблице 4.1 представлен список приборов и их измерительные функции.



Рисунок 4.1 - Карта расположения пункта наблюдения за аэрозолем относительно метеостанции.

Таблица 4.1 Приборная база для наблюдения за концентрацией аэрозоля на станции Тикси

| Наименование измерительного прибора                    | Предназначение                                                                                      |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Аэталометр (AE22)                                      | Измерение концентрации аэрозольных частиц в диапазоне 370...880 нм.                                 |
| Аэродинамический анализатор частиц (APS)               | Измерение концентрации аэрозольных частиц в диапазоне 0,5...10 мкм.                                 |
| Фотометр (Cimel)                                       | Вычисление оптических толщин аэрозоля и водяного пара.                                              |
| Конденсационный счетчик частиц (CPC)                   | Измерение концентрации аэрозольных частиц размерами до 10 нм.                                       |
| Измеритель размера частиц различной подвижности (DMPS) | Прибор для измерения концентрации аэрозольных частиц в диапазоне:<br>- 3...90 нм;<br>- 15...800 нм. |
| Многоугольный абсорбционный фотометр (MAAP)            | Измерение концентрации черного углерода в воздухе.                                                  |
| Нефелометр                                             | Измеряет интегральный коэффициент рассеяния аэрозолей.                                              |

В работах [103, 104] показано, что основной вклад в изменчивость ЭХА вносят аэрозоли, расположенные в диапазоне размеров 10...200 нм. Из представленного списка приборов для оценки аэрозольной обстановки под цели исследования подходят данные, получаемые прибором DMPS. Однако, стоит отметить, что при анализе полученных данных, было выявлено, что канал, отвечающий за измерения более малых размеров частиц (3...90 нм), начиная с

середины 2014 года зачастую проводил измерения с ошибкой, о чем свидетельствует соответствующий статус, говорящий о неисправности конденсационного счетчика частиц. Процентная доля случаев простоя данного канала составляет порядка 60%. В связи с этим, при совместной обработке данных концентрации аэрозоля и ЭХА в течение длительного периода использовались данные более грубого режима (15...800 нм).

Данный прибор позволяет получать спектр распределения аэрозольных частиц по размерам. При измерении в режиме 3...90 нм спектр состоит из 20 размеров, во втором режиме – 30 размеров. Концентрации рассчитываются с интервалом времени раз в 10 минут. За период с 2013 по 2018 год было получено порядка  $2,8 \cdot 10^5$  уникальных записей, из которых по причинам неисправности, статистически необоснованных выбросов или ошибки измерителя потока воздуха были не взяты в обработку 14% от общего количества записей.

#### 4.3. Особенности распределения атмосферного аэрозоля на станции Тикси

Станция Тикси, как уже упоминалось ранее, расположена вдали от крупных промышленных регионов, в радиусе нескольких тысяч километров отсутствует какая-либо промышленная деятельность, за исключением деятельности по жизнеобеспечению поселка. Все это вкупе позволяет рассматривать данную станцию, как фоновую при наблюдении за концентрацией атмосферного аэрозоля.

Концентрация аэрозоля на данной станции варьируется в пределах от нескольких единиц до  $2600 \text{ в см}^3$ , также присутствуют случаи единичных скачков, которые по причине отсутствия статистической оправдываемости были исключены из выборки. Количество данных случаев составило менее 0,1%. На рисунке 4.2 представлена гистограмма распределения концентрации аэрозольных частиц по частоте проявления. Данный график представлен в логарифмической шкале для удобства отображения. Также на графике отображена кривая логнормального распределения. Из графика видно, что на долю концентраций от 0 до  $200 \text{ см}^3$  приходится наибольшее количество случаев (более 150000), на

следующий интервал (200...400 см<sup>3</sup>) приходится уже на порядок меньше (18000). Медианное значение  $N_{Me} = 120 \text{ см}^{-3}$  при этом, среднее значение составило  $\bar{N} = 120 \text{ см}^{-3}$ . Значения первого интервала можно принять за фоновые для данного пункта.

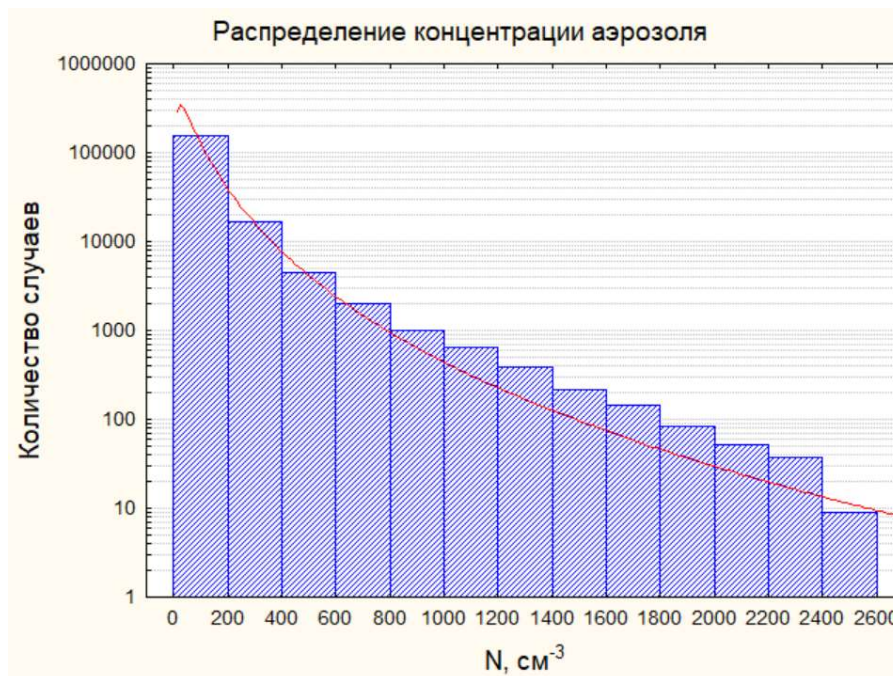


Рисунок 4.2 – Гистограмма распределения концентрации аэрозольных частиц.

В разных источниках представлены данные о характерных концентрациях аэрозольных частиц в различных регионах. Так, например, в работе [106] показано, что над океанами, вдали от береговой линии, концентрация частиц в диапазоне от 10 до 200 нм составляет 300-500 см<sup>-3</sup>. В статье [107] представлены результаты наблюдений, полученные во время экспедиции на остров Врангеля, концентрация частиц (10...500 нм) на острове в период с 12 по 18 мая составляла  $(0,7...2,9) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . В недавней статье [107] рассматривался вопрос о распределении концентрации на станции Тикси. Авторами были обобщены данные за 4 года непрерывных наблюдений по двум приборам (DMPC и APS) и проанализированы сезонные вариации. По результатам данной работы выявлены средние значения для сезонных минимумов в ноябре (183 см<sup>-3</sup>) и максимумов в июле (724 см<sup>-3</sup>).

На рисунке 4.3 представлена диаграмма распределения концентрации аэрозоля по месяцам в виде «ящиков с усами». Поскольку распределение имеет



большой разброс в сторону больших значений, имеет смысл строить сезонный ход концентрации по медианным значениям. Кривой на диаграмме обозначен сезонный ход медианных значений концентрации.

Полученные значения сильно отличаются от данных приведенных в работе [107] это связано с тем, в данной работе рассмотрен более узкий спектр распределения частиц. Также, авторами приводятся средние значения концентраций, которые для данной работы в среднем выше на 83%. Помимо этого, максимум приходится на февраль в отличии от статьи, при этом минимум концентрации выпадает на ноябрь, что подтверждается авторами. Июльский максимум скорее всего обусловлен увеличением аэрозольных частиц в диапазоне 0,5...10 мкм, которые не рассматриваются в данной работе. В этот диапазон попадают частицы пыли, морской соли, а также пыльца растений, которые обильно цветут в данный период года. Данное предположение также высказывается авторами. Стоит отметить, что общая массовая концентрация по данным, приводимым в статье имеет максимум распределения в феврале-марте и два минимума в июне и сентябре-октябре.

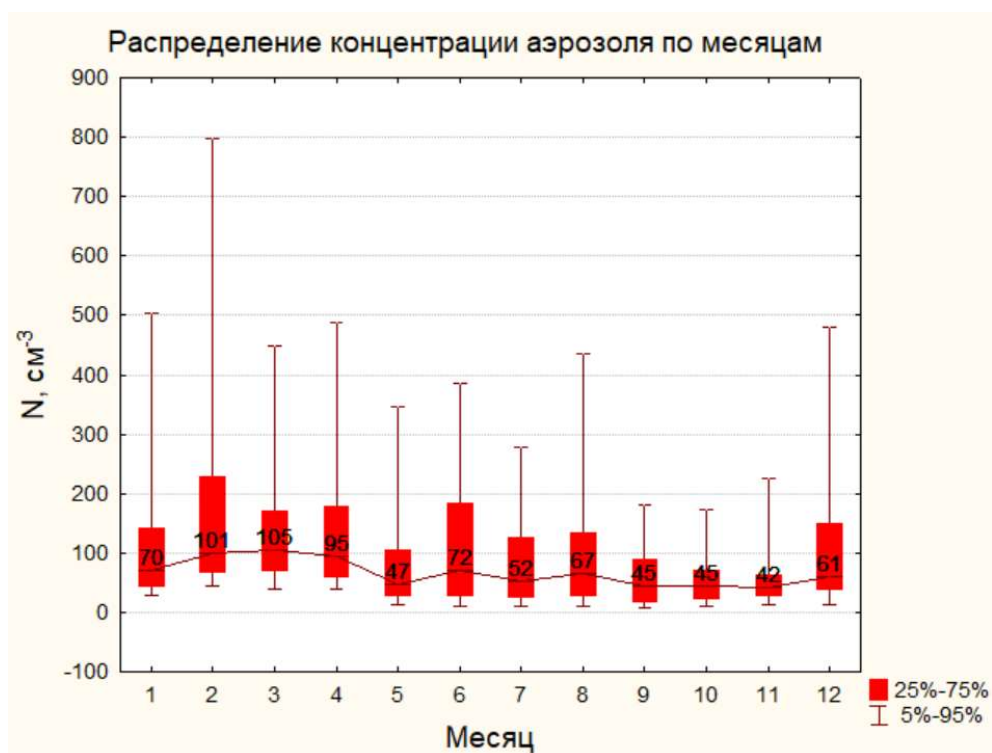


Рисунок 4.3 - Диаграмма распределения концентраций аэрозольных частиц по месяцам.

Стоит также рассмотреть спектр распределения частиц по размерам. На рисунке 4.4 представлена гистограмма данного распределения. На диаграмму нанесены данные с 2х режимов, в которых производятся измерения, концентрации в диапазоне 3...90 нм полученные до 2014 года и 15...800 нм за период 2013- 2018 годы. Из диаграммы видно, что максимум распределения приходится на размеры 45...65 нм, также присутствует локальный полумаксимум (100...135 нм). Из графика видно, что значения, измеренные более грубым режимом больше на 20-30% значений более чувствительного режима измерений.

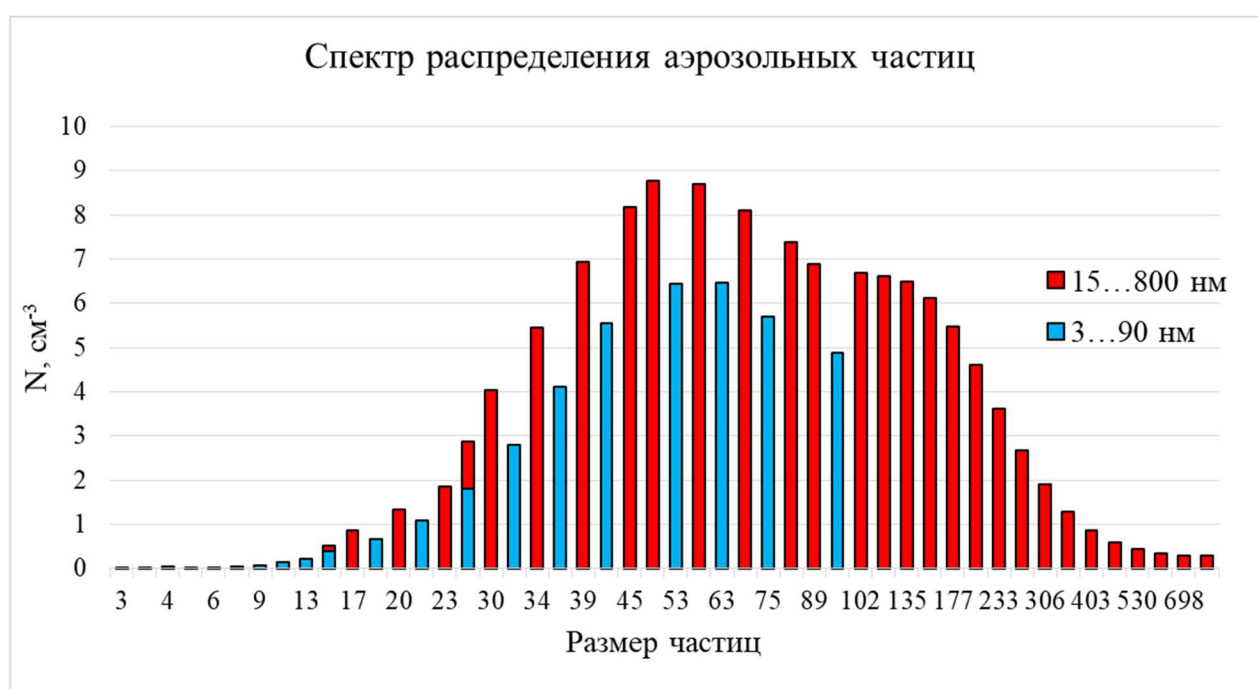


Рисунок 4.4 - Спектр распределения аэрозольных частиц по размерам.

#### 4.4. Экспериментальные исследования влияние аэрозольных частиц на электричество приземного слоя

Проблема влияния аэрозольных частиц субмикронного диапазона на электрическую проводимость воздуха в приземном слое рассматривалась в работах, которые проводились в ГГО в 80-90 годах прошлого столетия [22, 106]. Электрическая проводимость воздуха определяется концентрацией легких положительных  $\lambda_+$  и отрицательных  $\lambda_-$  ионов, подвижность которых лежит в диапазоне от  $0,1 \cdot 10^{-4}$  до  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·В<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>. Известно, что находящиеся в воздухе

аэрозольные частицы собирают на себе легкие ионы, что, как следствие, приводит к уменьшению  $\lambda_{\pm}$  [1]. На основании этого, можно получать косвенные оценки уровня аэрозольного загрязнения воздуха при наблюдениях за  $\lambda_{\pm}$ .

В данном разделе рассматриваются результаты совместных наблюдений за напряженность электрического поля, суммарной электрической проводимостью воздуха ( $\sum\lambda = \lambda_+ + \lambda_-$ ) и концентрацией аэрозольных частиц. Ранее говорилось, что концентрация аэрозоля имеет выраженный сезонный ход, где максимум приходится на февраль-март. На рисунке 4.5 представлены график сезонного хода всех анализируемых параметров. При этом, выборка  $E$  проводилась по методике, описанной в главе 3 данной работы и представлена в декавольтах на метр (даВ/м) для удобства размещения их на одной оси с  $\sum\lambda$ . Информация об ЭХА представлена средними значениями за период с 2013 по 2020 годы,  $N$  представлена медианными значениями за период с 2013 по 2018 годы.

Из графика видно, что сезонные вариации  $\sum\lambda$  находятся в противофазе к вариациям  $N$ , принимая максимальные значения в период сентябрь-октябрь, а минимальные в февраль-март. Концентрация аэрозоля, при этом, в те же периоды имеет обратные экстремумы. Весенний минимум  $\sum\lambda$  и, соответственно, максимум  $N$  обусловлен таким явлением, как арктическая дымка. Данное явление определяется дальним меридиональным переносом аэрозолей различного происхождения из средних широт в зимне-весенний период.

Зависимость сезонной изменчивости  $E$  от  $N$  не выражена не столь заметно, повторяемость колебаний проявляется в период с апреля по июль. Коэффициенты корреляции Пирсона между  $N$  и  $\sum\lambda$  составил -0,82 и 0,56 между  $E$  и  $N$ .

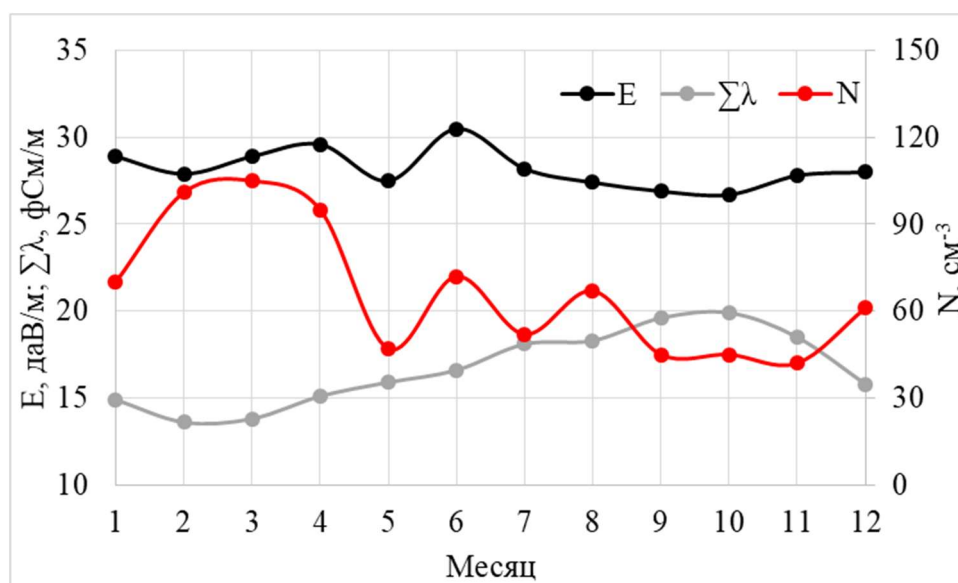


Рисунок 4.5 - Сезонный ход электрических характеристик атмосферы и концентрации аэрозольных частиц.

Помимо сезонных вариаций также были рассмотрены суточные вариации анализируемых параметров. Для анализа были выбраны дни, удовлетворяющие условиям «хорошей погоды». В течение этих дней не наблюдалось никаких метеоявлений кроме инея, изморози и полярных сияний, поскольку отсутствуют подтверждения влияния данных явлений на вариации ЭХА. Помимо метеоявлений также обязательными условиями были: отсутствие облачности нижнего яруса, балл общей облачности не превышал 5, а также скорость ветра, в том числе его порывы, не превышали 5 м/с. Помимо прочего обязательным условием являлась корректная работа оборудования, как минимум по наблюдениям за  $N$  и  $E$ , поскольку по различным причинам данные могли не соответствовать действительным.

За период с сентября 2013 года по июнь 2018 (момент остановки наблюдений за аэрозолем) было выделено 9 дней, удовлетворяющих заданным условиям. На рисунке 4.6 представлены графики суточных изменчивостей  $E$ ,  $N$  и  $\Sigma\lambda$  для каждого из выбранных дней. Значения каждого параметра усреднялись по 30 минут.

В предыдущем разделе было выдвинуто предположение о фоновых значениях концентрации (до 200 см<sup>-3</sup>). По итогу анализа, полученные графики можно условно разделить на 2 группы. К первой группе относятся дни, в течение

которых значения концентрации не превышали фоновых (23.02.2014, 10.11.2014, 05.01.2017, 13.01.2017). Последняя из представленных дат имеет единичный выброс в 12:30 ВСВ, превышающий фоновое значение ( $302 \text{ см}^{-3}$ ), которым можно пренебречь, относя этот день к первой группе. В это же время наблюдается разовый скачок  $E$ . Ко второй группе, относятся дни, когда на протяжении длительного времени  $N$  была выше фоновых (19.02.2014, 24.02.2014, 23.11.2014, 15.04.2016, 21.02.2017).

Помимо суточных вариаций  $E$ ,  $N$  и  $\sum \lambda$  на графиках также представлены кривые полиномиальных аппроксимации 3-го порядка, характеризующий количество экстремумов. Также представлены величины достоверности аппроксимации ( $R^2$ ). Для дней, входящих в 1-ю группу, данные кривые имеют вид полуволны с утренним минимумом и вечерним максимумом, характерной для унитарной вариации.

Значения  $R^2$  для 23.02.2014 и 13.01.2017 составляют 0,85 и 0,76 соответственно, при этом, если увеличивать степень полинома, данные значения увеличиваются только в 3-м порядке. Для 10.11.2014 и 05.01.2017 показатель  $R^2$  составляет 0,55 и 0,63 соответственно, изменения же  $R^2$  при увеличении степени полинома до 4-й степени значительно изменяет данный параметр уже в 1-м порядке, при этом не показывая значительного роста при дальнейшем увеличении, данная особенность предположительно обусловлена тем, что в эти дни наблюдается утренний полумаксимум, больше характерный для континентальных станций.

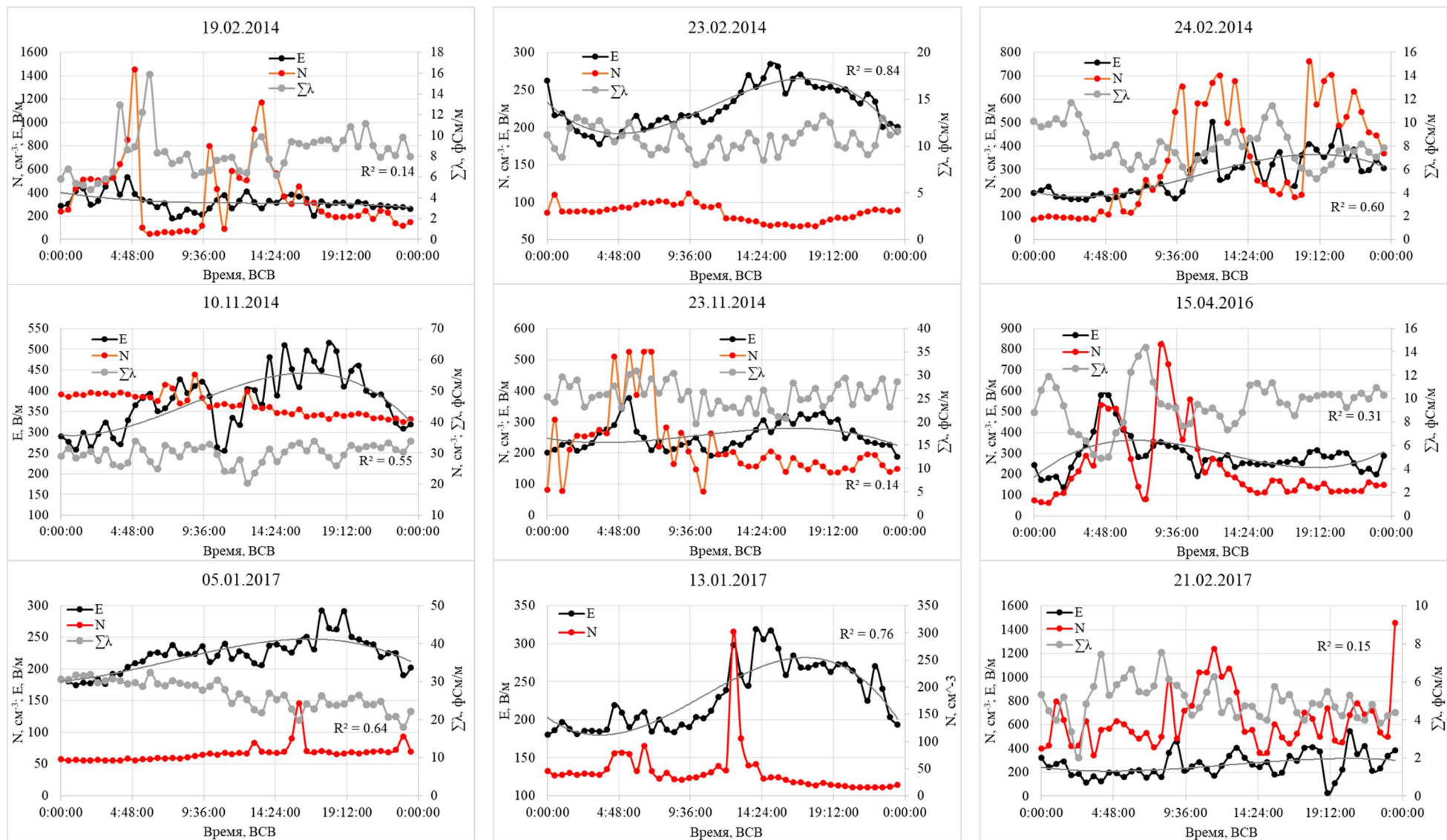


Рисунок 4.6 - Графики суточных вариаций  $E$ ,  $N$  и  $\Sigma\lambda$  в дни, удовлетворяющие критериям «Хорошей погоды».

В свою очередь, дни, входящие во 2-ю группу унитарная вариация либо слабо выражена (23.11.2014, 21.02.2017), либо имеет отличный от данной кривой вид (19.02.2014, 15.04.2016). При этом  $R^2$  составил 0,14, 0,14, 0,31 и 0,15 соответственно, что говорит об отсутствии достоверности при аппроксимации. Отдельно стоит отметить 24.02.2014, где наблюдается суточный ход, характерный для унитарной вариации и  $R^2=0,6$ . В данном случае вечерний максимум предположительно обусловлен увеличением количества аэрозольных частиц в послеполуденные часы. Подобное явление можно также наблюдать 15.04.2016, когда утренний максимум превышает вечерний, за счет появления объемного заряда, вызванного высокой концентрацией аэрозоля.

Уникальность 23-24.02.2014 также заключается в том, что условия «хорошей погоды» наблюдались на протяжении 2-х дней подряд, что для данного региона встречается достаточно редко. Метеорологические условия в этот период изменялись незначительно: на протяжении всего периода была ясная погода, метеорологическая дальность видимости составляла 20 км; направление ветра преимущественно Ю, реже ЮЗ (данный сектор является «чистым»); скорость ветра 0-2 м/с, в один срок (23.02.2014 6:00) до 5 м/с; температура плавно понижалась с -38,6 до -43,6 °С; атмосферное давление показывало плавный рост от 1027,5 до 1032,1 гПа. Анализ стандартных метеорологических параметров показывает, что в течение указанных дат не было никаких предпосылок для возникновения аэрозоля. Предположительно аэрозольные частицы могли появиться из верхних слоев атмосферы за счет нисходящих потоков воздуха, ближе к центру антициклона.

При анализе суточных вариаций  $\sum \lambda$  в указанные даты, корреляционных связей выявлено не было, диапазон коэффициентов лежит в пределах от 0,26 до -0,69. Зачастую отрицательные значения коэффициента корреляции проявляются в локальных случаях. Наилучшее значение было продемонстрировано 05.01.2017,  $\sum \lambda$  в этот день имеет слабовыраженный отрицательный тренд, в то время, как  $N$  плавно возрастает, при этом, в вариации обоих параметров присутствует локальный выброс в 16:00.

#### 4.5. Проявление эффекта воздействия аэрозольных частиц в рамках фонового мониторинга ЭХА

Как говорилось в разделе 3.5, данные об ЭХА ежегодно публикуются в обзорах фонового состояния окружающей среды [95-98]. Зачастую происходят сценарии, когда значения ЭХА в различные месяцы значительно отличаются от фоновых за предыдущие годы, в том числе могут выходить за пределы стандартного отклонения. В таких случаях приходится искать причину возникновения данных отклонений.

В большинстве случаев это происходит из-за погодных условий, например, в следствии увеличения количества метеоявлений, оказывающих сильное воздействие на ЭХА. Также может влиять синоптическая ситуация, когда на протяжении длительного времени могут происходить изменения в ветровом режиме, таким образом меняя тип воздушной массы, которая определяет наличие или отсутствие аэрозоля. Но случаются ситуации, когда метеоусловия были достаточно неизменны. Далее будут рассмотрены показательные случаи, когда происходили непреднамеренные изменения аэрозольной концентрации в окрестностях станций наблюдения за ЭХА, повлекшие за собой отклонения от фоновых значений.

***Лесные и торфяные пожары в Иркутской области.*** По данным СМИ [109] общая площадь пожаров в 2015 году в Иркутской области составила более 522 тысяч га. На рисунке 4.7 представлены изменения ЭХА в результате воздействия на атмосферу продуктов горения от интенсивных пожаров на большой площади в окрестностях Иркутска.

Представленные на графиках результаты демонстрируют зависимость ЭХА от аэрозольного воздействия, обусловленного интенсивными лесными пожарами на обширных территориях Иркутской области в 2015 г. Значения  $E$  несколько выше, а значения  $\Sigma\lambda$  несколько ниже в июне 2015 г. по сравнению с тем же месяцем за 2014, 2016 и 2017 года, когда по данным МЧС территория, охваченная пожарами, была незначительной [10].



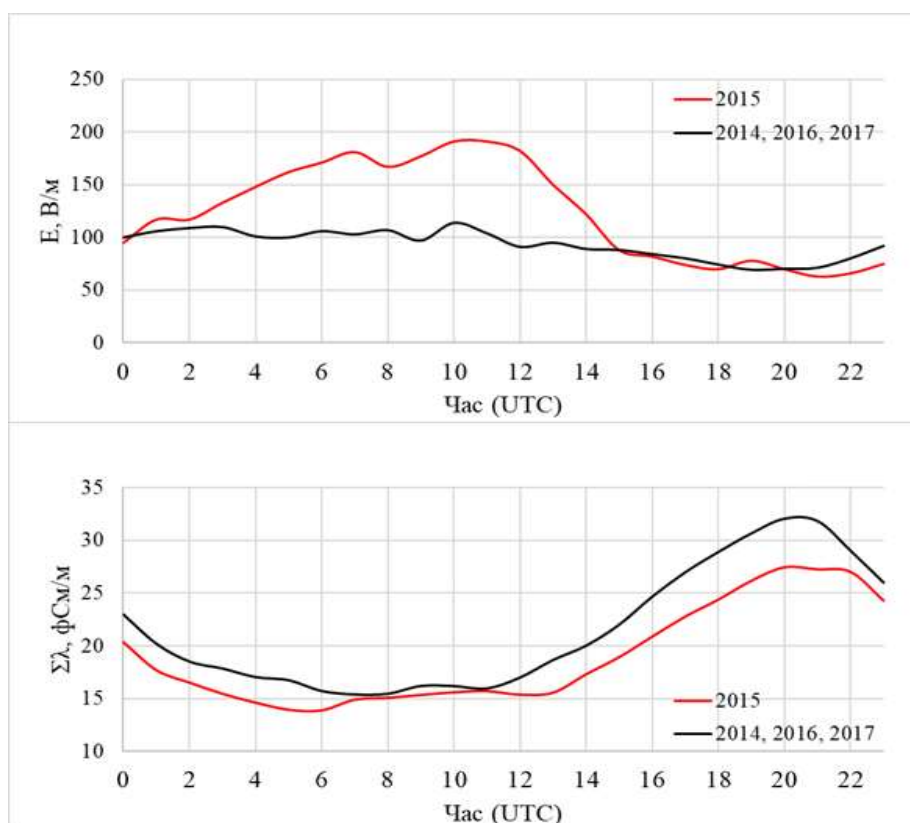


Рисунок 4.7 – Средний суточный ход  $E$ ,  $\Sigma\lambda$  в июне 2015 г. (красная линия) и в июне 2014, 2016 и 2017 гг. (черная линия)

**Ослабление хозяйственной деятельности.** Проведение мер по предотвращению распространения коронавирусной инфекции COVID-19 весной 2020 года, как предполагается, привел к резкому спаду аэрозольных выбросов в атмосферу за счет сокращения транспортного движения, а также приостановления работ в различных сферах деятельности человека.

В ходе эксперимента были рассмотрены 3 станции (Тикси, Воейково и Иркутск), каждая из которых относится к одной из групп, описанных в разделе 3.1. Для каждой станции были построены суточные вариации ЭХА в «спокойные часы» в период с апреля по май 2020 на фоне осредненных за предыдущие 5 лет аналогичных периодов (рисунок 4.8).

Рассматривая суточные вариации  $E$  видно, что суточный ход за указанный период на станциях Воейково и Иркутск в 2020 г. практически совпадает с осредненным за тот же период предыдущих пяти лет с незначительным уменьшением  $E$  по абсолютным значениям. На станции Тикси значения  $E$  в 2020 г. несколько ниже, что может быть связано с уменьшенным объемом использованных

данных в результате выборки по критериям «спокойных часов», а именно значительные осадки в этот период. Как следует из рис.1, на станциях Воейково и Иркутск в 2020 г. наблюдается значительное увеличение  $\Sigma\lambda$  по сравнению с осредненными с 2015 по 2019 гг. данными за аналогичный период (май-апрель). На станции Тикси значения  $\Sigma\lambda$  практически не изменились [110].

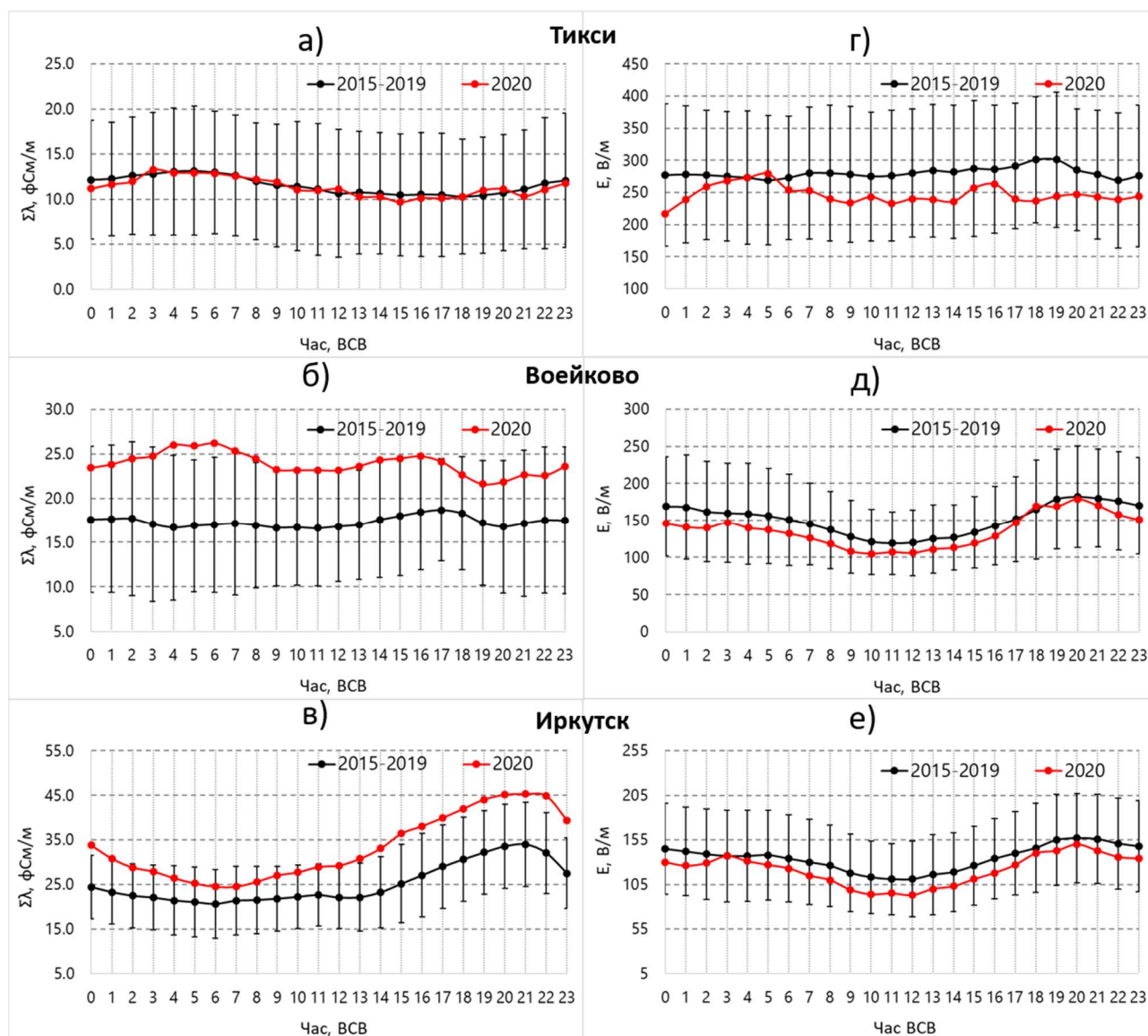


Рисунок 4.8 – Суточные вариации  $\Sigma\lambda$  и  $E$  в период с мая по апрель 2020 года на фоне средних значений в те же месяцы за период с 2015 по 2019

Уменьшение интенсивности аэрозольного воздействия в результате введения усиленных карантинных мер, ограничивающих хозяйственную деятельность, включая движения транспорта, хорошо иллюстрируется рисунком 4.9, на котором представлена зависимость  $\lambda$  от направления ветра на станции Воейково.

Осредненные за 5 предыдущих лет значения  $\lambda$  – синяя кривая, за 2020г. – красная кривая.

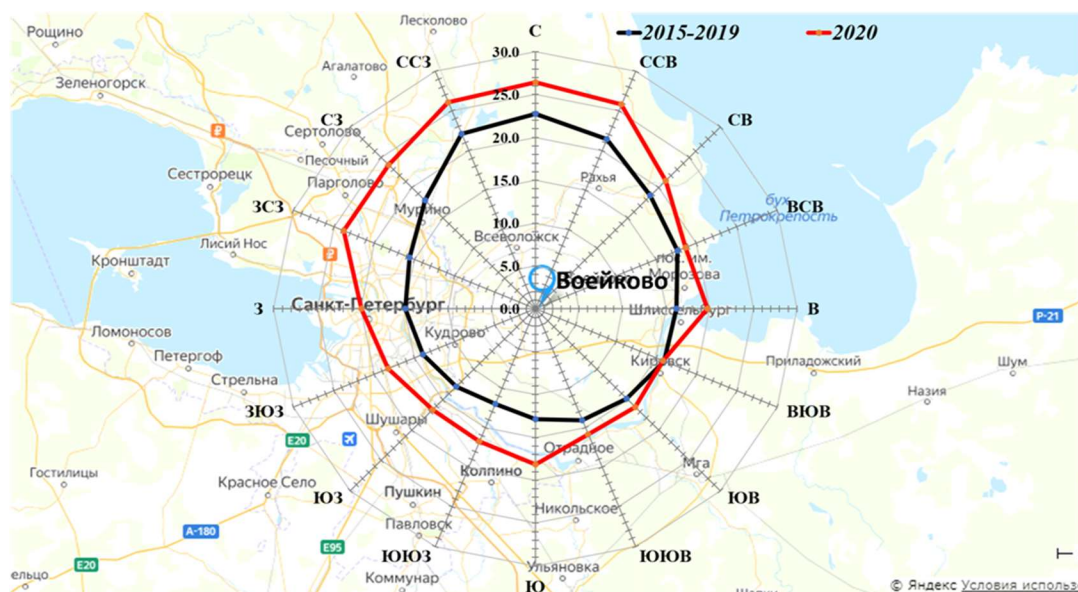


Рисунок 8 – Распределение значений суммарной электрической проводимости  $\Sigma\lambda$  в зависимости от розы ветров в п. Воейково с апреля по май 2020 г. и средние значения  $\Sigma\lambda$  в те же месяцы за период с 2015 по 2019 г.

По осредненным за 5 лет данным (черная диаграмма) хорошо прослеживается влияние промышленного мегаполиса Санкт-Петербурга. При направлениях из секторов ЗСЗ-З-ЮЗ-ЮЮЗ значения  $\lambda$  значительно ниже значений со стороны «чистых» направлений (лесные массивы и Ладожское озеро). Значения за 2020 год (красная диаграмма) значительно выше предыдущих, причем при направлениях ветра со стороны Санкт-Петербурга это превышение составляет порядка 30%, а со стороны «чистых» направлений менее 10 %. Единственное направление, в котором значения были сравнимы это ВЮВ, что, возможно, связано с наименьшим количеством случаев, зафиксированных с данного сектора [110].

## Выводы к главе 4

Представленные в данной главе анализ многолетних совместных наблюдений за ЭХА и счетной концентрацией аэрозольных частиц субмикронного диапазона в приземном слое на станции Тикси показал наличие высоких корреляционных связей между  $N$  и  $\sum\lambda$  в сезонной динамике, обусловленной таким явлением, как арктическая дымка в зимне-весенний период и её отсутствие в летне-осенний. Данная особенность в очередной раз подтверждает существующие теоретические модели влияния концентрации аэрозольных частиц на концентрацию аэроионов, от которой, в свою очередь, зависит электрическая проводимость воздуха.

Анализ суточных вариаций  $E$  в условиях «хорошей погоды» показал сильное влияние аэрозоля, создающего объемный заряд. Изменения в классическом ходе унитарной вариации  $E$  возникают в периоды, когда происходит резкий выброс аэрозоля, а также в дни, когда значения концентрации значительно превышают фоновые значения.

Основным выводом данной главы является то, что при анализе данных наблюдений за ЭХА для периодов «хорошей погоды» недостаточно общепринятых критериев, основанных лишь стандартной метеоинформации. Помимо данной информации необходимо также учитывать возможное возникновение стороннего объемного заряда в виде аэрозольных взвесей, присутствующих в воздухе, фиксация которых не входит в стандартную программу наблюдения метеостанций, а возможно только лишь при наличии специализированных аппаратно-программных комплексов.

Рассмотренные примеры фонового мониторинга ЭХА в очередной раз доказывают возможность применения данного вида наблюдений в качестве индикатора аэрозольного загрязнения.

## Заключение

Как показано в данной диссертационной работе, что атмосферно-электрические характеристики являются интегральным показателем аэрозольного загрязнения атмосферы. В связи с возросшим в последние два десятилетия интересом к арктической зоне (разработка шельфовой нефти, вновь созданного северного морского пути и т.д.) определяемые в оперативном режиме аномальные, по сравнению со среднестатистическими фоновыми, значения электрических параметров могут свидетельствовать о значительных аэрозольных загрязнениях в данном регионе, вызванных как непреднамеренными, так и преднамеренными воздействиями, что является весьма актуальным в настоящее время.

Помимо этого, мониторинг электрического состояния приземного слоя, как отклика процессов, протекающих в ионосфере, позволяет отслеживать состояние ГЭЦ. Для регионов с низкой или отсутствующей антропогенной нагрузкой данный мониторинг наиболее актуален.

Полученные в диссертационной работе научные результаты 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  $\Delta E$  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 фоновоего мониторинга ЭХА.

## Список используемой литературы

1. Брикар Дж. Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества // Проблемы атмосферного электричества. Труды III Международной конференции по электричеству атмосферы и космического пространства. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. С. 68–104.
2. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 421 с.
3. Шварц Я. М., Огуряева Л. В. Многолетний ход величин атмосферного электричества в приземном слое // МиГ. 1987. № 7. С. 59–64.
4. Дячук В. А., Будак И. В., Гордюк В. П., Шварц Я. М. О влиянии радиоактивных выбросов на электрическое состояние атмосферы // IV Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Нальчик, 1990. С. 54–55.
5. Михайловский Ю. П., Зайнетдинов Б. Г., Синькевич А. А., Pawar S. D., Торопова М. Л., Куров А. Б., Gopalakrishnan V. Об эффективности контроля электрического состояния облаков дистанционными радиофизическими средствами в ближней зоне // Оптика атмосферы и океана. 2022. Том 35, Вып. № 03. С. 205–211.
6. Морозов В. Н., Селезнева А. Н. К обобщению модели глобальной атмосферно-электрической цепи с учетом влияния пограничного слоя атмосферы // Труды ГГО. 1988. № 514. С. 60–74.
7. Калинин А. В., Слюняев Н. Н., Мареев Е. А., Жидков А. А. Стационарные и нестационарные модели глобальной электрической цепи: корректность, аналитические соотношения, численная реализация // Изв. РАН ФАО. 2014. Том. 50, Вып. № 3. С. 355–364.
8. Морозов В. Н. Модели глобальной атмосферно-электрической цепи // ВНИИГМИ- МЦД. Серия Метеорология. Обзорная информация. 1981. № 8.
9. Жидков А. А., Калинин А. В. Численное исследование задачи об определении электрических полей в квазистационарном электрическом приближении //



- Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2007. С. 53–54.
10. Калинин А. В., Жидков А. А. Интегральное тождество для определения элетрического потенциала в квазистационарном электрическом приближении // Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург. Санкт-Петербург, 2007. С. 51–52.
  11. Мареева О. В., Мареев Е. А., Калинин А. В., Жидков А. А. Моделирование конвективного тока и его суточной вариации в глобальной электрической цепи // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 163–165.
  12. Морозов В. Н. Теоретические исследования по глобальной электрической цепи в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова // Сборник трудов VIII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. Нальчик, 2019. С. 37–39.
  13. Морозов В. Н. Теоретические исследования глобальной электрической цепи в атмосфере (Обзор) // Труды ГГО. 2020. № 597. С. 6–33.
  14. Hays C. B., Roble R. G. A quasi-static model of global atmospheric elerctricity. 1. The lower atmosphere // Journal of geophysical research. 1979. Vol. 84, № A7. P. 3291–3305.
  15. Roble R. G., Hays C. B. A quasi-static model of global atmospheric elerctricity. 2. Electrical coupling between the upper atmosphere and lower atmosphere // Journal of geophysical research. 1979. Vol. 84, № A12. P. 7247–7256.
  16. Roble R. G. On modeling component processes in the Earths global electric circuit // J. Atm. Terrest. Phys. 1991. Vol. 53, № 9. P. 3291–3305.
  17. Ogawa T. Fair-weather electricity // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90, № D4. P. 5951–5960.
  18. Sarkota B. K., Varshneya C. On the global atmospheric electrical circuit // J. Atm. Terrest. Phys. 1990. Vol. 52, № 1. P. 4–17.
  19. Имянитов И. М., Павлюченков Г. Ф., Чубарина Е. В., Шварц Я. М. Элетрические характеристики атмосферы над Арктикой // Труды I

- Всесоюзного симпозиума по Атмосферному электричеству. Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. С. 87–92.
20. Имянитов И. М., Чубарина Е. В. Электричество свободной атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1965. 240 с.
  21. Шварц Я. М., Ваюшина Г. П., Соколенко Л. Г. Измерение величин атмосферного электричества в прибрежном районе // Труды II Всесоюзного симпозиума. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. С. 53–55.
  22. Русина Е. Н., Хлебникова Е. И., Шварц Я. М. Электрическая проводимость воздуха и ее связь с характеристиками фонового загрязнения атмосферы // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО). 2000. № 2 (548). С. 3–10.
  23. Морозов В. Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. Санкт-Петербург: РГГМУ, 2011.
  24. Морозов В. Н., Куповых Г. В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя. Изд. 2-е испр. и доп. Санкт-Петербург: ФГБУ “ГГО,” 2017. 307 с.
  25. Морозов В. Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. С. 395–408.
  26. Морозов В. Н. Влияние нестационарной составляющей грозовых процессов на электрическое состояние атмосферы // Вопросы атмосферного электричества. Гидрометеиздат. Ленинград, 1990. С. 147–157.
  27. Давыденко С. С., Маршалл Т., Штольценбург М. Электрические свойства мезомасштабных конвективных систем и оценка их вклада в глобальную цепь // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 67–69.
  28. Makino M., Ogawa T. Quantitative Estimation of Global Circuit // Journal of geophysical research. 1985. Vol. 90, № D4. P. 5961–5966.
  29. Мареев Е. А. Глобальная элетрическая цепь: достижения и проблемы // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 159–163.

30. Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Москва: Мир, 1974. 384 с.
31. Давыденко С. С. Влияние крупномасштабных ионосферных течений на электрическое поле в нижней атмосфере // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 62–63.
32. Давыденко С. С. О влиянии нетвердотельности вращения ионосферы на эффект планетарного электрического генератора // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2007. С. 49–50.
33. Давыденко С. С. Влияние ионосферных течений на эффект планетарного электрического генератора // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Vol. 52, № 2. С. 226–236.
34. Морозов В. Н. Распределение электрического поля, создаваемого ионосферным генератором в нижних слоях атмосферы // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 172–175.
35. Кудринская Т. В. et al. Эффекты солнечной активности в вариациях электрического поля приземной атмосферы // Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. Казань: КФУ, 2019. С. 557–560.
36. Кудринская Т. В., Куповых Г. В., Аджиев А. Х., Зайнетдинов Б. Г. Исследование проявлений солнечно-земных связей в динамике приземного атмосферно-электрического поля // Сборник тезисов докладов конференции Солнечно-Земные связи и физика предвестников землетрясений. с. Паратунка: ИКИР ДВО РАН, 2020. С. 13–14.
37. Мареев Е. А., Трахтенгерц В. Ю. Загадки атмосферного электричества // Природа. 2007. № 3. С. 24–33.
38. Анисимов С. В., Мареев Е. А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. 2008. № 10. С. 8–18.

39. Ильин И. В., Шаталина М. В., Слюняев Н. Н. Моделирование сезонной динамики суточной вариации глобальной электрической цепи // Изв. РАН ФАО. 2019. Том. 55, Вып. № 5. С. 76–84.
40. Мареев Е. А., Анисимов С. В., Давыденко С. С., Яшунин С. А. Некоторые проблемы динамики и энергетики глобальной электрической цепи // Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2007. С. 57–58.
41. Морозов В. Н. Теоретическое моделирование электрических процессов в нижних слоях свободной атмосферы: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Санкт-Петербург, 1995. 366 с.
42. Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
43. Куповых Г. В., Морозов В. Н. Классический (нетурбулентный) электродный эффект в приземном слое // Известия ВУЗов. Сев.-Кав. Регион. Естеств. науки. 2003. № 2(122). С. 43–46.
44. Куповых Г. В., Морозов В. Н. Турбулентный электродный эффект в атмосфере // Известия ВУЗов. Сев.-Кав. Регион. Естеств. науки. 2003. № Прил. №3. С. 43–46.
45. Нагорский П. М., Кобранова А. А., Ланская О. Г., Морозов В. Н., Пустовалов К. Н. Динамика электродного слоя во время прохождения мощной кучевой облачности // Известия ВУЗов. Физика. 2016. Том. 59, Вып. № 12–3. С. 205–210.
46. Нагорский П. М., Морозов В. Н., Смирнов С. В., Афонюшкин А. В., Пустовалов К. Н. Электродный слой в электрическом поле мощной конвективной облачности // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2013. Том. 56, Вып. № 11–12. С. 853–863.
47. Нагорский П. М., Морозов В. Н. Электродный слой в электрическом поле мощной конвективной облачности с учетом влияния аэрозольных частиц // Труды ГГО. 2015. № 578. С. 7–22.

48. Пустовалов К. Н., Нагорский П. М. Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // Оптика атмосферы и океана. 2016. Том. 29, Вып. № 8. С. 647–653.
49. Герасименко Н. И., Зайнетдинов Б. Г., Морозов В. Н., Попов И. Б. Исследование вариаций напряженности электрического поля атмосферы во время гроз с помощью методов вейвлет-анализа // Труды ГГО. 2015. № 576. С. 81–91.
50. Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Нагорский П. М., Оглезнева М. В., Пустовалов К. Н., Смирнов С. В., Филатов Д. Е. Динамика спектра атмосферно-электрических и метеорологических величин приземного слоя во время выпадения ливневых осадков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. № S674. С. 188–194.
51. Пхалагов Ю. А., Ужегов В. Н., Полькоин В. В., Козлов В. И., Ипполитов И. И., Нагорский П. М. Исследования изменчивости и взаимосвязи оптических и электрических характеристик приземной атмосферы в зимних условиях // Оптика атмосферы и океана. 2011. Том. 24, Вып. № 4. С. 269–274.
52. Козлов В. И., Нагорский П. М., Пустовалов К. Н., Смирнов С. В., Торопов А. А. Основные сценарии развития вариаций атмосферно-электрических величин в приземной атмосфере во время сильных морозов на территории Сибири // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2019. Том. 29, Вып. № 4. С. 135–148.
53. Попов И. Б. Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // Труды ГГО. 2008. № 558. С. 152–161.
54. Алешков В. М., Коваленко В. А., Молодых С. И., Шаманский Ю. В. Исследование атмосферного электричества на высокогорных станциях // Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2007. С. 41–42.
55. Калов Р. Х., Аджиев Х. М. Исследование напряженности электрического поля атмосферы в г. Нальчик, по данным измерителя электрического поля EFM550

- // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 101–103.
56. Аджиев А. Х., Клово А. Г. Кудринская Т. В., Куповых Г. В., Тимошенко Д. В. Суточные вариации атмосферного электрического поля в турбулентном приземном слое // Известия РАН. Физика Атмосферы и океана. 2021. Том. 57, Вып. № 4. С. 452–461.
57. Антонова В. П., Дробжев В. И., Шлюгаев Ю. В. Наблюдения вариаций электрического поля на Тянь-Шане в разных географических условиях, включая сейсмические // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 29–30.
58. Гордюк В. П. Электрические характеристики атмосферы по данным измерений в 26-й САЭ // Труды II Всесоюзного симпозиума Атмосферное электричество. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. С. 53–62.
59. Соколенко Л. Г., Стерхов П. Л. Годовые вариации напряженности электрического поля атмосферы и полярных электрических проводимостей воздуха по данным измерений на станции Восток // Труды ГГО. 2017. № 587. С. 116–124.
60. Франк-Каменецкий А. В., Лукьянова Р. Ю., Морозов В. Н., Барнс Г. Определение реальной величины атмосферного электрического поля на ст. Восток в Антарктиде // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2007. С. 61–62.
61. Frank-Kamenetsky A. V., Troshichev O. A., Burns G. B., Papitashvili V. O. Variations of the atmospheric electric field in the near-pole region related to the interplanetary magnetic field // Journal of geophysical research. 2001. Vol. 106, № A1. P. 179–190.
62. Морозов В. Н., Трошичев О. А. Моделирование вариаций полярного атмосферно-электрического поля, связанного с магнитосферными продольными токами // Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2007. С. 58а-58б.

63. Frank-Kamenetsky A. V., Kotikov A. L., Kruglov A. A., Burns G. B., Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., Kubitski M., Odzimek A. Variations in the near-surface atmospheric electric field at high latitudes and ionospheric potential during geomagnetic perturbations // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012. Vol. 52. P. 629–638.
64. Зайнетдинов Б. Г., Михайловский Ю. П., Соколенко Л. Г., Стерхов П. Л. Наземные и самолётные исследования электрических характеристик атмосферы в Советской и Российской Арктике. Прошлые, настоящее, будущее // *Материалы Восьмой Международной научно-практической конференции Полярные чтения – 2020*. СПб: Паулсен, 2021. С. 118–125.
65. Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Нагорский П. М., Пхалагов Ю. А., Смирнов С. В. Суточные вариации напряженности электрического поля в дымах от лесных пожаров // *Доклады академии наук*. 2013. Том. 453, Вып. № 2. С. 207–210.
66. Нагорский П. М., Пустовалов К. Н., Смирнов С. В. Дымовые шлейфы от природных пожаров и электрическое состояние приземного слоя атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Том. 35, Вып. № 2 (397). С. 155–161.
67. Имянитов И. М., Колоколов В. П. Исследование электрического поля атмосферы // *Труды ГГО*. 1974. № 334. С. 232–250.
68. Анисимов С. В., Афиногенов К. В., Гурьев А. В., Дмитриев Э. М. Атмосферные электрические наблюдения на геофизической обсерватории “Борок” // *Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству*. Санкт-Петербург, 2012. С. 24–26.
69. Анисимов С. В. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт // *Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству*. Санкт-Петербург, 2012. С. 18–21.
70. Анисимов С. В. Геофизические аспекты исследования глобальной электрической цепи // *Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству*. Санкт-Петербург, 2007. С. 7–10.

71. Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В. Моделирование электрического состояния конвективного планетарного пограничного слоя // Сборник трудов VII Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2012. С. 26–28.
72. Анисимов С. В., Мареев Е. А., Шихова Н. М., Клименко В. В., Дмитриев Э. М., Шлюгаев Ю. В., Афиногенов К. В. Аэроэлектрические наблюдения на регионально разнесенных станциях // Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2007. С. 43–44.
73. Nicoll K. A., Harrison R. G., Barta V., Bor J., Brugge R., Chillingarian A., Chun J., Georgoulas A. K., Guha A., Kourtidis K., Kubicki M., Mareev E. A., Matthews J., Mktchyan H., Odzimek A., Raulin J.-P., Robert D., Silva H. G., Tacza J., Yair Y., Yaniv R. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // JASTC. 2019. № 184. P. 18–29.
74. Lucas G. M., Thiler J. C., Deierling W. Statistical analysis of spatial and temporal variations in atmospheric electric fields from a regional array of field mills // Journal of geophysical research: Atmosphere. 2017. Vol. 122, № 2. P. 1158–1174.
75. Tacza J. et al. A new South American network to study the atmospheric electric field and its variations related to geophysical phenomena // JASTC. 2014. № 120. P. 70–79.
76. Chinese Meridian Project [Electronic resource]: Электронный ресурс // Data Center For Meridian Space Weather Project. URL: <https://data.meridianproject.ac.cn/about-us/>.
77. Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. Результаты модернизации и расширения сети наблюдений за атмосферным электричеством // Труды ГГО. 2018. № 589. С. 153–166.
78. Соколенко Л. Г., Попов И. Б., Зайнетдинов Б. Г. О результатах модернизации атмосферно-электрической сети станций Росгидромета // Материалы Второй Всероссийской конференции. п. Борок: ООО “Филигрань,” 2015. С. 114–115.



79. Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. Итоги усовершенствования сети Росгидромета по наблюдениям за электрическими характеристиками атмосферы // Сборник трудов конференции VIII Российской конференции по атмосферному электричеству. Нальчик: ВКА им. Можайского, 2019. С. 7–9.
80. Занюков В. В., Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. Многолетние тенденции и современные изменения параметров атмосферного электричества // Труды ГГО. 2024. № 612. С. 136–154.
81. Cole R. K., Pierce E. T. Electrification in the Earth's atmosphere // Journal of Geophysical Research. 1965. Vol. 70, № 12. P. 2735–2749.
82. Морозов В. Н. О временных изменениях электрического поля атмосферы // Сборник трудов. Санкт-Петербург, 2012. С. 172–173.
83. Морозов В. Н., Щукин Г.Г. Моделирование атмосферно-электрических процессов (глобальная электрическая цепь, электризация грозовых облаков) // Труды ГГО. 2008. № 557. С. 102–118.
84. Makino M., Ogawa T. Responses of atmospheric electric field and air-earth current to variation of conductivity profiles // J. Atm. Terrest. Phys. 1984. Vol. 46, № 5. P. 431–435.
85. Морозов В. Н. Влияние глобального распределения аэрозольных частиц на электрический потенциал ионосферы // Труды ГГО. 2015. № 577. P. 106–112.
86. Морозов В. Н. Влияние глобального распределения аэрозольных частиц на электрический потенциал ионосферы // Труды ГГО. 2015. № 577. С. 106–112.
87. Зайнетдинов Б. Г., Морозов В. Н., Занюков В. В. Влияние аэрозольных частиц в приземном слое воздуха на элементы глобальной электрической цепи в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2024. Vol. 37, № 05. С. 409–414.
88. Морозов В. Н., Зайнетдинов Б. Г., Занюков В. В. Влияние аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь // Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции. п. Нижний Архыз: ЮФУ, 2022. С. 304–309.

89. Hoppel W. A., Frich G. Ion-aerosol attachment coefficients on the steady-state charge distributions on aerosols in bipolar ion environment // Aerosol Science and Technology. 1986. Vol. 5, № 1. P. 1–21.
90. 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.
91. Зайнетдинов Б. Г., Занюков В. В., Львова М. В., Михайловский Ю. П. Результаты анализа данных о напряженности электрического поля атмосферы с целью обнаружения молниевых разрядов в ближней зоне // Труды IX Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 2023.
92. 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.
93. Парамонов Н. А. Некоторые результаты наблюдений за градиентом электрического потенциала в атмосфере над территорией Советского Союза // Труды ГГО. 1956. № 58 (120). С. 81–99.
94. Зайнетдинов Б. Г. Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе // Труды ГГО. 2018. № 588. С. 47–61.
95. Апарин Б. В., Пуголовкин В. В. Методические указания по автоматизированной обработке гидрометеорологической информации. Выпуск 3. Метеорологическая информация неавтоматизированных гидрометеорологических станций и постов. Часть 1. Метеорологическая информация станций. Раздел 1. Занесение информации на технический носитель. ВНИИГМИ-МЦД, 2005.
96. 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 военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2020. С. 176–180.
97. 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.
98. 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. 41–43.
99. 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. 40–43.
100. 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.
101. 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.
102. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с английского. Москва: Мир, 1987. 280 с.
103. Поповичева О. Б., Персианцева Н. М., Ситников Н. М., Киреева Е. Д., Тимофеев М. А., Шония Н. К., Мовчан В. В. Арктический аэрозоль на архипелаге Северная Земля: наблюдения и анализ состава и микроструктуры // Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС «Ледовая база Мыс Баранова». СПб: ААНИИ, 2021. С. 48–59.

104. Донченко В. А., Кабанов М.В., Кауль Б. В., Нагорский П. М. Электрооптические явления в атмосфере. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2015. 316 с.
105. Морозов В. Н., Палей А. А., Писанко Ю. В., Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г. Экспериментальные и теоретические исследования влияния аэрозольных частиц субмикронного аэрозоля на электричество приземного слоя // Труды ГГО. 2018. № 590. С. 27–47.
106. Морозов В. Н., Палей А. А., Писанко Ю. В. Роль ионизации в образовании и эволюции субмикронных аэрозольных частиц // Оптика атмосф. и океана. 2020. Том. 33, Вып. № 5. С. 368–382.
107. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen N., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hattaka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivakhov V., Makshtas A. Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian arctic // Atm. Chem. and Phys. 2016. Vol. 6, № 3. P. 1271–1283.
108. Шварц Я. М. Электропроводность воздуха и аэрозоль // Труды ГГО. 1980. № 401. С. 136–140.
109. ТОП-6 крупных пожаров в Иркутской области в 2015 году представляет ИА IrkutskMedia [Electronic resource]: Электронный ресурс // IrkutskMedia. 2016. URL: <https://irkutskmedia.ru/news/480729/>.
110. 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. № 3. С. 47–54.