

На правах рукописи



САРАФАНОВ Федор Георгиевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПАТТЕРНЫ
ПАРАМЕТРОВ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ:
НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики имени А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель:

Мареев Евгений Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН, ФГБНУ
«Федеральный исследовательский центр Институт
прикладной физики имени А. В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты:

Клименко Максим Владимирович,
доктор физико-математических наук, доцент,
Калининградский филиал ФГБУН Института
земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова (г. Калининград);

Дмитриев Эльдар Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
Геофизическая обсерватория «Борок», филиал
ФГБУН Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Российской академии наук (пос. Борок, Ярославская обл.)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Российский государственный гидрометеорологический
университет» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «20» октября 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.238.03 при Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте (www.ipfran.ru/training/sovet/dissertations) ИПФ РАН.

Автореферат разослан «8» сентября 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 24.1.238.03
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Глобальной электрической цепью постоянного тока (ГЭЦ) в современной геофизике называют замкнутый квазистатический токовый контур в атмосфере [1, 2], образуемый множеством восходящих к нижним слоям ионосферы токов от грозовых облаков и электрически активных конвективных систем и нисходящих токов проводимости. Замыкание токового контура происходит, с одной стороны, на хорошо проводящих поверхностях суши и океана. С другой стороны, быстрое увеличение проводимости атмосферы с высотой позволяет полагать нижние слои ионосферы приблизительно эквипотенциальными и также предполагать на них замыкание токового контура [3, 4]. Потенциал верхней границы ГЭЦ относительно Земли принято называть ионосферным потенциалом. Экспоненциальный закон роста проводимости является следствием ионизации атмосферы космическими высокоэнергичными частицами [5]. Концепция ГЭЦ объединяет самые крупномасштабные атмосферные процессы с динамикой локальных значений потенциала и заряда. Она также лежит в основе теории воздействия электрических полей, в том числе хорошей погоды, на процессы образования облаков [6]. Изучение задачи о том, как электрическая активность в атмосфере влияет на облака, их структуру и распределение, т.е. задачи об обратных связях в ГЭЦ, представляет отдельный интерес [7].

Основными измеряемыми параметрами ГЭЦ являются проводимость атмосферы, ионосферный потенциал, напряжённость приземного атмосферного электрического поля хорошей погоды, вертикальный ток хорошей погоды [8]. Существующие измерения профиля проводимости [9] и ионосферного потенциала производились фрагментарно [10, 11], так как требуют технически сложных баллонных или самолётных натурных наблюдений [12]. Технически более просты и поэтому широко используются измерения напряжённости атмосферного поля [13, 14]; однако недостатком последних является существенное влияние локальной проводимости. Измерения тока в большей степени освобождены от недостатков локального искажения, но сложны инструментально из-за крайне малой ($\sim 4 \text{ пА/м}^2$) плотности тока хорошей погоды [15, 16].

Натурные наблюдения оставались основным инструментом исследования ГЭЦ вплоть до настоящего времени, несмотря на их недостатки. Наиболее широко известна из наблюдений суточная вариация атмосферного электрического поля хорошей погоды [17]. Попытки исследовать более крупные временные масштабы изменчивости ГЭЦ давно предпринимались исследователями [8, 18]. Неоднократно выдвигались гипотезы о существенной связи между погодно-климатическим состоянием атмосфе-

ры и квазистатическими электрическими процессами в ней [19]. Однако используемые методы исследования не позволили сделать однозначных выводов о механизмах наблюдаемых связей: данных наблюдений таких интегральных величин, как электрическое поле или ток хорошей погоды, оказывается принципиально недостаточно для разрешения динамики пространственной структуры токов в ГЭЦ. При этом остаётся важной задача измерения параметров ГЭЦ, как в неискажённых условиях, так и во время электрически возмущённой погоды [20]. Электрические возмущения связаны с электрически активными и грозовыми облаками и разрядами молний в последних. Роль молний в контексте ГЭЦ постоянного тока двоякая: с одной стороны, существенно нестационарный ток молний даёт небольшой вклад в значение ионосферного потенциала. С другой стороны, молнии являются прямым признаком наличия тока разделения заряда в облаках.

Необходимым шагом на пути исследования разномасштабных связей атмосферного электричества с погодно-климатическим состоянием атмосферы является разработка и совершенствование моделей ГЭЦ на базе численного воспроизведения динамики атмосферы [21–23]. Особое внимание при этом требуется уделить воспроизведению пространственно-временных паттернов источников ГЭЦ. Слово «паттерн» буквально означает «повторяющийся узор». Применение этого термина более широко: часто под ним понимается устойчивая закономерность [24], в частности, имеющая выраженный пространственный характер. В диссертации под пространственно-временными паттернами имеются в виду закономерности, отражающие взаимосвязи между пространственным распределением электрической активности в атмосфере и динамикой ионосферного потенциала.

Совместное использование данных натуральных наблюдений и результатов моделирования способствует разработке согласованной картины воздействия погоды и климата на ГЭЦ, что особенно актуально в контексте изменения климата [19, 25].

Цели и задачи диссертации

Основной целью данной работы является исследование физических механизмов связи состояния атмосферы с основными параметрами ГЭЦ: проводимостью атмосферы, источниками тока и ионосферным потенциалом на различных пространственно-временных масштабах. Для достижения указанной цели были решены следующие научно-исследовательские задачи:

1. Исследование стационарной ГЭЦ постоянного тока в контексте численного моделирования в двумерной постановке.
2. Адаптация численной модели ГЭЦ к использованию в моделях прогноза погоды и климата, реализация в коде климатической модели ИВМ РАН.

3. Анализ суточной и сезонной динамики распределения модельных источников ГЭЦ и верификация вариаций модельного ионосферного потенциала по данным натурных наблюдений.
4. Анализ данных натурных наблюдений региональных и глобальных систем грозопеленгации, исследование корреляций молниевой активности с параметрами ГЭЦ постоянного тока.
5. Исследование данных натурных наблюдений параметров ГЭЦ, в том числе во время электрически возмущённой погоды, с помощью сети наблюдений напряжённости квазистатического электрического поля; разработка миниатюрного устройства для измерения вертикального профиля напряжённости электрического поля.

Научная новизна работы

В диссертации представлены новые результаты оригинальных исследований ГЭЦ постоянного тока. С помощью погодно-климатического моделирования исследованы механизмы влияния состояния атмосферы на параметры ГЭЦ. Впервые предложена параметризация ионосферного потенциала с учётом приземной температуры, в которой динамика ГЭЦ согласуется на суточном и сезонном масштабе с наблюдениями электрического поля на станции «Восток», отбираемыми по новым критериям «хорошей погоды». Динамика на суточном и сезонном масштабе, а также на масштабе колебания Маддена — Джулиана воспроизведена с помощью оригинального метода кластеризации натурных данных о глобальном распределении молниевых разрядов. Наблюдения электрически возмущённой погоды, в том числе грозовых событий осуществлялись с помощью как существующих инструментов, так и созданных в рамках работы.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные в работе результаты могут иметь важное значение и в теоретических, и в практических приложениях. Численное моделирование ГЭЦ на базе погодных и климатических моделей позволяет развивать теорию формирования ГЭЦ, изучая воспроизводимые пространственно-временные паттерны электрической активности в атмосфере Земли. Методы изучения структуры вкладов отдельных регионов в ионосферный потенциал могут применяться для анализа внутритропических мод; ионосферный потенциал при этом становится новым, дополнительным по отношению к базовым переменным (температура, влажность, осадки и т.п.) интегральным индикатором состояния атмосферы. Полученные в численной модели суточно-сезонные паттерны ГЭЦ необходимы для практических задач интерпретации данных натурных измерений приземного электрического поля хорошей погоды и оценки их репрезентативности.

Методология и методы исследования

Для исследований использовались численные методы воспроизведения состояния атмосферы с часовым разрешением на базе признанных мировым научным сообществом модели прогноза погоды WRF [26] и климатической модели INMCM [27]. Результаты моделирования сравнивались с результатами натурных наблюдений, в том числе полученными по данным новых грозопеленгационной и флюксометрической сетей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Моделирование ГЭЦ с помощью параметризаций источников тока на базе погодных и климатических моделей позволяет воспроизвести реалистичное пространственное распределение электрически активных облаков, дающих вклад в ионосферный потенциал, на различных временных масштабах, в том числе суточном и сезонном.
2. Усовершенствованная с учётом приземной температуры параметризация токов разделения заряда приводит к реалистичному, соответствующему натурным наблюдениям паттерну суточно-сезонной вариации ионосферного потенциала, сохраняя воспроизводимость в модели ГЭЦ откликов на события различных климатических мод.
3. Применение критериев хорошей погоды по значениям поля позволяет извлечь из долговременных измерений электрического поля на антарктической станции «Восток» глобальные сигналы, определяемые динамикой источников ГЭЦ постоянного тока.
4. Данные глобальных и региональных сетей грозопеленгации пригодны для воспроизведения усреднённых откликов ГЭЦ при использовании предложенного в работе метода кластеризации пространственного распределения разрядов молний.

Достоверность полученных результатов

Достоверность обеспечена сопоставлением результатов с доступными данными натурных наблюдений, демонстрирующим качественное согласие, и верификацией динамики воспроизводимых характеристик ГЭЦ в различных погодных и климатических моделях, широко используемых научным сообществом. Изучение физических механизмов формирования откликов ГЭЦ на климатические моды велось с учётом результатов исследований других авторов.

Апробация результатов

По теме диссертации опубликовано 19 работ [A1—A19], из которых 6 статей в журналах из международных баз рецензируемых журналов

(Scopus, WoS) и перечня научных изданий ВАК [A1—A6], 1 статья в сборнике SPIE [A7], 8 тезисов конференций [A8—A15], а также 4 результата интеллектуальной деятельности [A16—A19], в том числе 1 патент на изобретение [A19].

Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях: V и VI Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (Борок, 4–8 октября 2021; 2–6 октября 2023), VI и VIII Всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего — наука молодых» (Калининград, 17–20 ноября 2021; Орёл, 20–23 сентября 2023), 17-й Международной конференции по атмосферному электричеству (Tel-Aviv, 19–24 июня 2022), XVII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 5–10 сентября 2022), XX и XXI научной школе «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 7–13 ноября 2022; 5–11 ноября 2024), XXIX Международном Симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Москва, 26–30 июня 2023), Всероссийской конференции «Национальная модель Земной системы: теория, технологии, результаты» (Сириус, 20–22 февраля 2024), II Всероссийской школе НИЦФМ по экспериментальной лабораторной астрофизике и геофизике (Сатис, 1–5 июля 2024), а также докладывались на внутренних семинарах ИПФ РАН.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор внёс определяющий вклад в работы, связанные с реализацией модели ГЭЦ в составе Национальной модели Земной системы и исследованием динамики основных электрических параметров в реализованной модели. Автор осуществил ключевые этапы разработки и совершенствования сетей грозопеленгации и мониторинга параметров ГЭЦ. Автором проведена основная часть исследований, касающихся разработки нового датчика атмосферного электрического поля. При активном участии автора изучены эффекты влияния климатических мод на ГЭЦ. Автором проанализированы и систематизированы измерения электрического поля хорошей погоды, в том числе с нижегородских и антарктических станций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из трёх глав, введения, заключения, списка обозначений, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объём диссертации составляет 175 страниц и включает 61 рисунок и 3 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 191 наименования. Нумерация рисунков и формул сквозная с указанием номера главы.

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** представлено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы основные цели, задачи и положения, выносимые на защиту, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования, отмечен личный вклад автора и его публикационная активность, приведено краткое содержание диссертации.

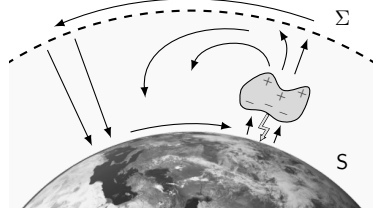


Рис. 1 — Структура ГЭЦ

В **Главе 1** диссертации рассматривается задача о ГЭЦ постоянного тока. Из уравнений Максвелла выводятся основные уравнения для модельной задачи. В модельной задаче задаются граничные условия идеального проводника на хорошо проводящих поверхности Земли (S) и нижних слоях ионосферы (Σ), рис. 1. Представлен переход к двумерной электротехнической модели, с использованием которой в диссертации исследуется динамика пространственного распределения токов разделения заряда в электрифицированных и грозовых облаках в ГЭЦ. Показаны подходы к параметризации плотности токов разделения заряда на базе погоднo-климатических моделей общей циркуляции атмосферы.

В **разделе 1.1** приводится краткий обзор концепции ГЭЦ и существующих моделей. Обсуждается постановка задачи, решение которой пригодно для адаптации к погоднo-климатическому моделированию: описываются типы источников, характерные временные и пространственные масштабы. Полагается, что на характерных погодных и климатических масштабах, которые могут быть воспроизведены при глобальном моделировании динамики атмосферы, достаточно рассмотреть стационарный случай $\partial/\partial t = 0$, в этом случае система уравнений Максвелла, дополненная граничными условиями и материальным соотношением $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \tilde{\mathbf{j}}$ может быть сведена к

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = \nabla \cdot \tilde{\mathbf{j}}, \quad \oint_S (\sigma \nabla \varphi - \mathbf{j}) \cdot \mathbf{n} dS = 0, \quad \varphi|_S = 0, \quad \varphi|_\Sigma = V_i, \quad (1)$$

где $\tilde{\mathbf{j}}$ — плотность стороннего тока (тока разделения заряда в электрифицированных облаках), $\varphi = -\nabla \mathbf{E}$ — скалярный потенциал, σ — распределение проводимости в атмосфере, S и Σ — сферические поверхности, моделирующие поверхность Земли и ионосферы, V_i — искомое значение ионосферного потенциала, которое требуется найти по заданному распределению источников. Показано, что V_i единственно для заданных $\tilde{\mathbf{j}}$ и σ . Проде-

монстрирован переход к двумерной (электротехнической) модели ГЭЦ, адаптированной к применению на расчётных сетках численных моделей атмосферы, где в каждом столбце сетки (1) переходит к

$$\frac{d}{dz} \left(-\sigma_{ij} \frac{d\varphi_{ij}}{dz} + \tilde{j}_{ij} \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad -\sigma_{ij} \frac{d\varphi_{ij}}{dz} + \tilde{j}_{ij} = \xi_{ij}. \quad (2)$$

Показано, что член в скобках имеет смысл плотности полного тока в столбце, переход от интегрирования к суммированию (2) имеет смысл уравнения баланса токов (Кирхгофа). Продемонстрировано, что значение ионосферного потенциала с учётом (1) и (2) определяется через известные на двумерной широтно-долготной сетке из $(n \times m)$ ячеек как

$$V_i = \sum_{i,j=1}^{n,m} \left[\frac{S_{ij} \int_0^H \frac{\tilde{j}_{ij} dz}{\sigma_{ij}}}{\int_0^H \frac{dz}{\sigma_{ij}}} \right] / \left[\sum_{i,j=1}^{n,m} \frac{S_{ij}}{\int_0^H \frac{dz}{\sigma_{ij}}} \right]. \quad (3)$$

В разделе 1.2 рассматриваются методы расчёта в двумерной модели основных параметров ГЭЦ: профиля атмосферной проводимости и плотности стороннего тока. Для плотности тока источников введены базовые предположения, связывающие её с крупномасштабными параметрами атмосферы: электрифицированные облака отождествляются с облаками глубокой конвекции, при этом плотность стороннего тока считается нулевой вне площади облака и постоянной j_0 в пределах облака, т.е. эффективная плотность тока для конкретного столбца на двумерной сетке

$$j_{ij} = j_0 \cdot \alpha, \quad \alpha \propto \frac{P}{W} \cdot H(\varepsilon - \varepsilon_0), \quad (4)$$

где P — конвективные осадки в ячейке за последний час, W — доступная влага в столбце, H — функция Хевисайда, ε — доступная конвекции потенциальная энергия (CAPE), ε_0 — пороговое значение CAPE 1000 кДж/кг. Известно, для разделения заряда в облаке необходима развитая глубокая конвекция; здесь она реализуется при превышении порогового значения ε_0 . Доля объёма занятой глубокой конвекцией области оценивается как отношение выпадающих конвективных осадков к полному содержанию влаги и, в предположении постоянной высоты облака, используется как доля площади α , занятой электрифицированным облаком.

Для задания в модели ГЭЦ профиля проводимости рассмотрена как простейшая аппроксимация $\sigma(z) = \sigma_0 \cdot \exp(z/z_{\max})$, где $z_{\max} \sim 6$ км, так и более совершенный подход, основанный на решении уравнения баланса ионизации, рекомбинации и прилипания, который приводит к профилю проводимости

$$\sigma = e_0 (\mu_+ + \mu_-) \frac{-\sum_i \beta_i n_i + \sqrt{(\sum_i \beta_i n_i)^2 + 4\alpha q}}{2\alpha}, \quad (5)$$

где $\mu_{\pm}$ — подвижности ионов, e_0 — элементарный заряд, n_i — концентрация аэрозольных частиц, α , β и q соответственно — коэффициенты рекомбинации, прилипания и скорость образования ионных пар, зависящие от высоты, геомагнитной широты и некоторых других параметров. Рассмотрены эмпирические законы, связывающие коэффициенты прилипания с радиусами аэрозольных частиц, β рассчитаны для типичных воспроизводимых в моделях атмосферы аэрозолей. Учтена эмиссия радона над сушей через экспоненциально спадающий с высотой $q_{\text{Rn}}^{222}(z)$, над океаном эмиссия не рассматривается. Обсуждён эмпирический учёт изменения проводимости в облаках.

В разделе 1.3 приводятся детали моделирования ГЭЦ (3) и (4) по данным состояния атмосферы в численной модели погоды WRF и модели климата INMCM. Для модели INMCM описана структура нового программного модуля, реализация которого основывается на теории из разделов 1.1–1.2 [A18]. С помощью нового модуля в INMCM и с помощью обработки данных расчётов WRF воспроизведена динамика ГЭЦ, включая вклады в ионосферный потенциал от каждой ячейки сетки, с часовым разрешением за период с 1980 по 2024 гг. Результаты моделирования привели к качественному соответствию пространственной структуры сторонних токов в моделях INMCM и WRF (рис. 2). Обсуждаются различия погодного и климатического моделирования ГЭЦ.

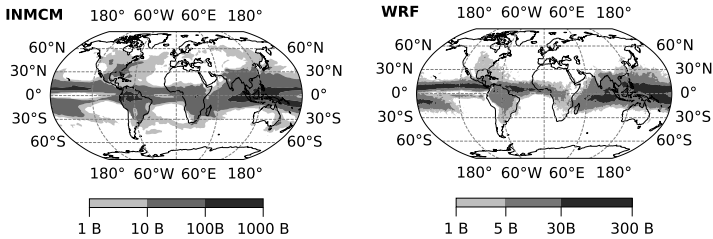


Рис. 2 — Пространственная структура вкладов в ИП, усредненная по 1980–2020 гг., в моделях INMCM и WRF. Разные значения вкладов связаны с отличием сетки: $1.5^\circ \times 2^\circ$ в INMCM и $1^\circ \times 1^\circ$ в WRF соответственно

В **Главе 2** рассматриваются различные пространственно-временные паттерны изменчивости ГЭЦ, возникающие при проявлении различных мод погодной и климатической изменчивости Земной системы, в первую очередь, из-за изменения интенсивности сторонних токов в отдельных регионах.

В **разделе 2.1** исследовано воспроизведение в моделях основного, известного из натурных наблюдений, паттерна — суточной вариации ГЭЦ. Изучено разбиение модельных вкладов по отдельным регионам, «грозовым центрам», динамика каждого из которых строго соответствует суточному циклу. Широтное распределение активности соответствует пространственному паттерну, а суточное — временному паттерну суточной вариации. Результаты сравнены с доступными данными наблюдений напряжённости электрического поля. Обсуждены отличия воспроизведения в моделях WRF и INMCM, показано, что INMCM менее пригодна для воспроизведения суточного масштаба ГЭЦ. Предложены новые идеи по усовершенствованию параметризации стороннего тока в ГЭЦ с использованием значений приземной температуры [A4]. Показано, что параметризация (4), дополненная множителем приземной температуры выше порогового значения $T_0 = 25^\circ\text{C}$:

$$\alpha' = \alpha \cdot \begin{cases} 0, & (\varepsilon_{ij} < \varepsilon_0) \vee (T < T_0), \\ T - T_0, & (\varepsilon_{ij} \geq \varepsilon_0) \wedge (T \geq T_0), \end{cases} \quad (6)$$

приводит к согласию амплитуды, но не фазы экстремумов суточной вариации с наблюдениями (рис. 3, T), а учёт заблаговременности в 2 часа в температуре, соответствующий тому, что от пика температурных колебаний до пика глубокой конвекции должно пройти характерное время, связанное с прогревом слоя воздуха, накоплением энергии неустойчивости и развитием глубокой конвекции, улучшает и согласие фазы экстремумов (рис. 3в). Показано, что в новой параметризации среднее местное время пика электрической активности приблизилось к 16:00 UT, что согласуется с известными наблюдениями, а дисперсия максимума в локальном времени уменьшилась с 4.5 до 1.8 часа.

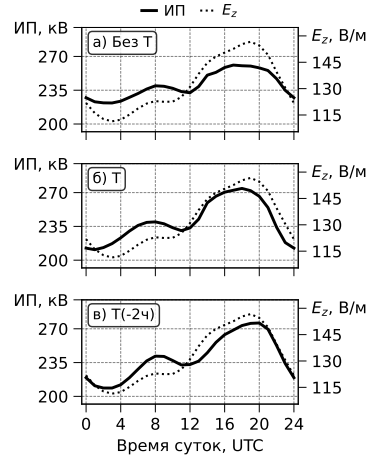


Рис. 3 — Суточная вариация ИП с разными параметризациями j_0 в сравнении с кривой Карнеги

В разделе 2.2 представлены результаты исследования воздействия одной из основных климатических мод, моды Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК), на форму суточной вариации ИП. Продemonстрировано статистически значимое изменение относительной суточной вариации ИП в 08:00–12:00 UT и 16:00–20:00 UT. Показано, что несмотря на сугубо атмосферную природу ГЭЦ, вклады над сушей и океаном на масштабах ЭНЮК принципиально противоположны, а их сумма даёт более слабый эффект на изменение ИП. Продemonстрировано, что и моделирование с параметризацией (6), и наблюдения E_z демонстрируют временной лаг в отклике ГЭЦ на события ЭНЮК, разный для разных часов суток, связанный с дальними связями ЭНЮК, как показано на корреляционных диаграммах на рис. 4.

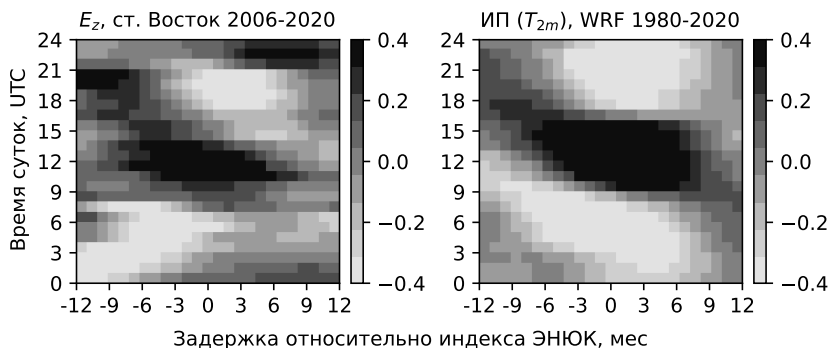


Рис. 4 — Диаграммы корреляций временного ряда аномалий пятидесятилетних средних: слева атмосферного электрического поля E_z на ст. «Восток» в 2006–2020 гг. (наблюдения), справа ИП с 1980–2020 гг. (моделирование), с временным рядом аномалии индекса океанического Ниньо с учётом лага между ними. Корреляция посчитана отдельно для каждого часа суток и каждого месяца

Для натурального подтверждения влияния ЭНЮК на ГЭЦ, полученного в моделировании [A1], был проведён анализ и систематизация антарктических наблюдений напряжённости вертикального квазистатического электрического поля E_z на станции «Восток», находящейся в одном из самых чистых с точки зрения аэрозольного загрязнения в мире мест на высоком антарктическом плато (78°S, 107°E; 3488 м над уровнем моря). Из данных измерений были отобраны дни хорошей погоды, для этого были разработаны критерии электрически хорошей погоды [A9], также применяемые в диссертации для анализа нижегородских измерений.

В разделе 2.3 описаны механизмы воздействия второй по значимости после ЭНЮК моды — колебания Маддена — Джулиана (КМД) — на

среднесуточное значение модельного ИП. Для достоверного определения корреляций из моделирования исключены линейные связи с ЭНЮК и сезонной изменчивостью и только затем рассмотрены аномалии вкладов отдельных областей тропического и субтропического регионов во время цикла КМД; выявлено статистически значимое увеличение абсолютного значения ИП в первых фазах моды КМД. Показано, что и в антарктических наблюдениях, и в моделировании присутствует вариация во время событий КМД [A2], воспроизводимая в модели и в старой, и в новой параметризациях (4) и (6).

В разделе 2.4 изучается сезонная вариация интенсивности ГЭЦ. Вопрос об определении качественного характера сезонной вариации оказывается нетривиальным, что связано с сложностью выделения устойчивого тренда по данным измерений: последние искажаются множеством факторов, имеющих сильную сезонную зависимость, в том числе локальной вариацией концентрации аэрозолей, эмиссии радона, осадков, температуры и т.д. Для определения характера сезонной вариации были исследованы временные ряды модельного ИП и наблюдаемого на ст. «Восток» E_z хорошей погоды, а также исследованы сезонные изменения вкладов в ИП от отдельных широт (рис. 5) в моделях INMCM6 и WRF, показана связь наблюдаемой изменчивости с циклом инсоляции (рис. 6).

Показано, что воспроизведение вкладов в ИП в моделях WRF и INMCM в целом даёт схожие картины с некоторыми отличиями в экваториальной зоне. Вклады северных и южных широт близки по амплитудам, что приводит к тому, что суммарная сезонная вариация высоко чувствительна к широтной структуре вкладов в ИП; близкие по форме и амплитуде вклады, незначительно отличающиеся друг от друга, приводят к почти противоположным сезонным вариациям.

Исследована чувствительность сезонной вариации в моделях INMCM и WRF к изменению порогового значения CAPE ε_0 ; показано, что сезонный тренд может сильно измениться от плавного тренда с максимумом boreальным летом при пороге в 600 Дж/кг до выраженного экваториального тренда с двумя максимумами при пороге в 1200 кДж/кг, что является признаком высокой чувствительности сезонной вариации к широтному распределению источников.

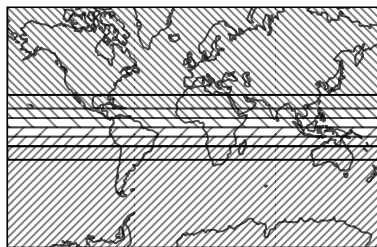


Рис. 5 — Широтные полосы, сезонная вариация вкладов в ИП от которых рассматривается отдельно для каждой из полос. Штриховка соответствует рис. 6

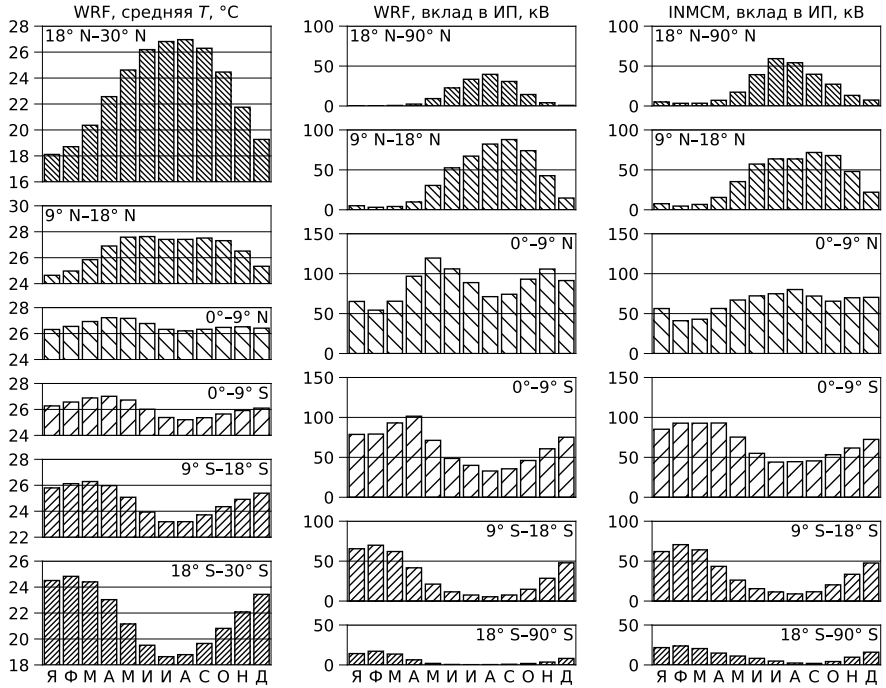


Рис. 6 — В первой колонке приведён сезонный ход значений температуры на уровне 2 метров, осреднённой по площади различных широтных полос; во второй и третьей колонках показан сезонный ход вкладов в ИП от этих же широтных полос для моделей WRF и INMCM соответственно

Рассмотрено воспроизведение сезонной вариации в старой и новой параметризациях (4) и (6); получено, что учёт температуры приводит сезонную вариацию в согласие с наблюдениями на ст. «Восток» при сохранении амплитуды сезонной вариации в $\sim 15\%$. И моделирование ИП, и наблюдения E_z согласуются в положении максимума: летом Северного полушария интенсивность ГЭЦ выше, чем зимой, что соответствует большей электрической активности над сушей и асимметрии распределения суши по полушариям [A3, A4]. Интенсивность ГЭЦ и в наблюдениях, и в моделировании демонстрирует связанность суточного и сезонного паттернов, что соответствует широтному и долготному смещению максимума инсоляции по Земле на масштабах года и суток соответственно, и моделирование хорошо воспроизводит эту связь (рис. 7).

В разделе 2.5 обсуждается совершенствование техники эксперимента с целью прямого измерения ИП вместо измерения приземного E_z , что может

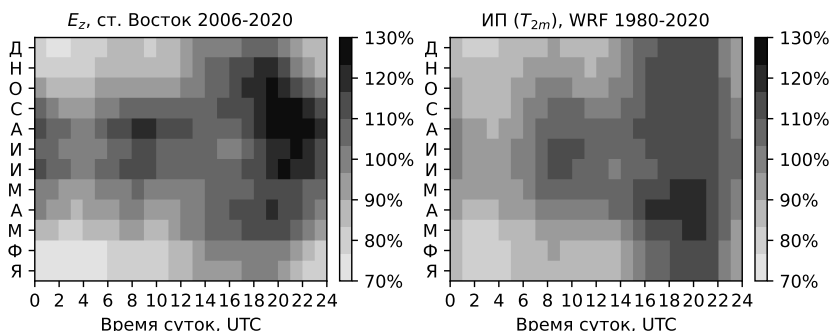


Рис. 7 — Слева: суточное и сезонное распределение напряжённости поля хорошей погоды, измеренного на ст. «Восток» в 2006–2020 гг. Справа: суточное и сезонное распределение значений ИП в 1980–2020 гг. Значения приведены в % от среднего и по месяцам, и по часам

помочь в исследовании тонких эффектов ГЭЦ, недоступных для наблюдения из-за локальных искажений. Продемонстрирована принципиальная схема и физические принципы работы нового легковесного датчика типа «вращающийся диполь», предназначенного для измерения вертикального профиля напряжённости электрического поля до высот 30–35 км и последующего расчёта ИП [A19]. Приведены технические детали создания прототипа датчика.

В **Главе 3** исследуются различные пространственные и временные паттерны молниевой активности: как глобальные, коррелирующие на отдельных масштабах с паттернами источников ГЭЦ, так и локальные, существенно связанные с орографией рассматриваемого региона. Рассматриваются данные о плотности разрядов молний по наблюдениям региональных и глобальных сетей грозопеленгации, совмещаемые с измерениями квазистатического электрического поля.

В **разделе 3.1** представляется связь глобального распределения молниевой активности с ГЭЦ постоянного тока. Представлен новый метод кластеризации, связывающий данные о плотности молниевых разрядов с токами разделения заряда в электрически активных и грозовых облаках: он позволяет реалистично воспроизвести распределение токов разделения заряда над сушей, что приводит к корректной форме и амплитуде суточной вариации глобального тока «плохой погоды», ассоциируемого с сторонним током в модели ГЭЦ (рис. 8).

Идея представленного нового метода состоит в понижении разрешения данных наблюдения глобальной сети грозопеленгации WWLLN на сетку

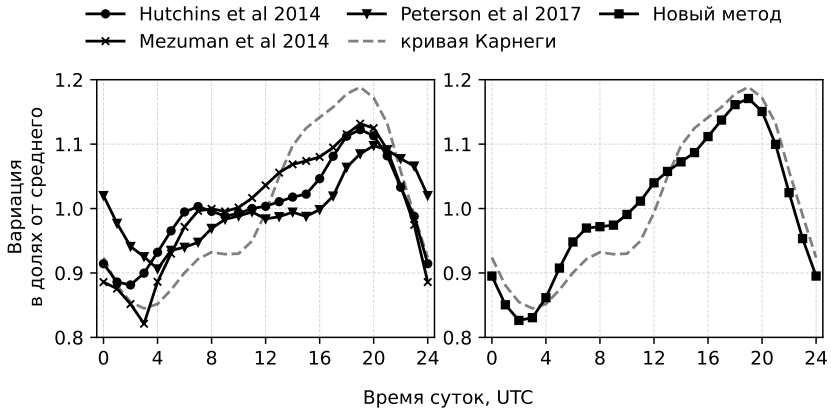


Рис. 8 — Суточные вариации ГЭЦ, нормированные на среднесуточные значения для каждой кривой, полученные с использованием различных подходов к определению глобального тока «плохой погоды». Пунктирной линией на обоих панелях приведена среднегодовая кривая Карнеги, сплошными линиями на левой панели показаны вариации по работам [28–30], сплошной линией на правой панели показана суточная вариация, полученная с использованием кластеризации данных WWLLN с 2015 по 2021 гг.

с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и шагом по времени в один час; ячейки с двумя и более разрядами в час считаются электрифицированными и им назначается фиксированная плотность стороннего тока j_0 . Глобальное значение тока получается суммированием каждый час токов из всех ячеек [A15]. Такая процедура отвечает за крупную кластеризацию разрядов, только размер кластера ограничен только одной ячейкой. Так как характерный размер уединённой конвективной ячейки составляет порядка десятков километров [A6], а размер ячейки сетки на порядок больше, ошибка кластеризации ограничена только теми случаями, когда кластеры оказываются примерно в равных частях разделёнными несколькими разными ячейками сетки.

Показано, что суточно-сезонный паттерн интенсивности такого глобального кластеризованного тока соответствует наблюдаемому на ст. «Восток» паттерну для напряжённости электрического поля хорошей погоды (рис. 9). Объяснены наблюдаемые сходства и различия, обсуждены ограничения метода кластеризации. Продемонстрировано ещё одно свидетельство глобальной репрезентативности полученного с помощью кластеризации тока — отклик на моду КМД. Кластеризация молний и данные антарктических наблюдений демонстрируют изменение интенсивности ГЭЦ во время событий КМД с максимумом во 2 фазе и минимумом в 6 фазе. Показано,

что количество молний или суммарный ток молний при этом не демонстрируют отклика на КМД, столь же схожего с наблюдаемым в новой кластеризации или в моделировании ИП (рис. 10).

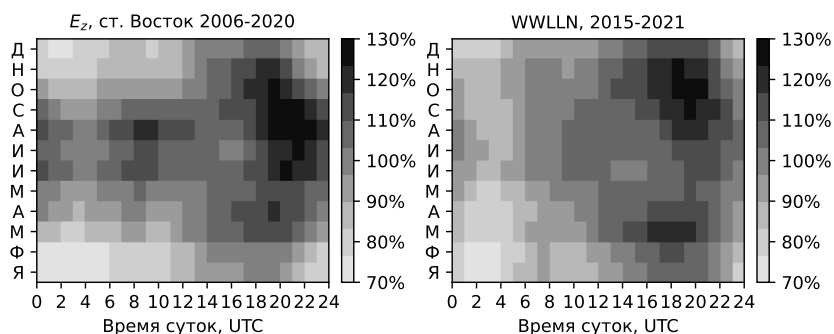


Рис. 9 — Суточно-сезонная диаграмма напряжённости атмосферного электрического поля E_z по наблюдениям на ст. «Восток» за 2006–2020 гг. и суточно-сезонная диаграмма кластеризованного тока, усреднённая по 2015–2021 гг. по данным WWLLN

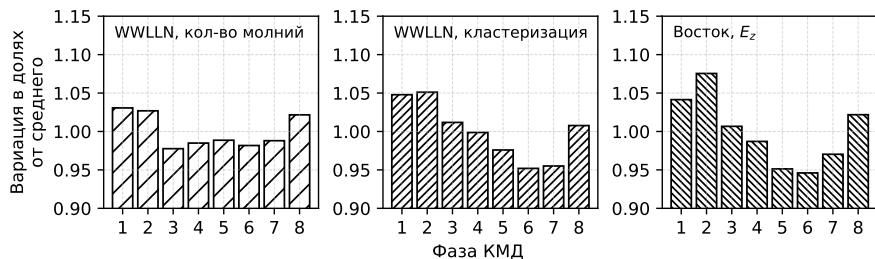


Рис. 10 — Изменение интенсивности ГЭЦ во время событий колебания Маддена — Джулиана (КМД) по данным WWLLN и данным антарктических наблюдений

В разделе 3.2 рассматриваются результаты наблюдений и техника эксперимента нижегородской грозопеленгационной сети (ГПС) NNLDN. Приведено описание и результаты численных экспериментов, по которым показано, что точность пеленгации существенно зависит от расположения дополнительных станций. Приведены критерии выбора оптимальной конфигурации сети и представлено текущее состояние развития ГПС. Результаты регистрации отдельной интенсивной грозы приведены на рис. 11. Для этой же грозы приведен пример применения метода кластеризации

молний к отдельной конвективной ячейке. Показано, что во время отдельных фронтальных гроз может наблюдаться рождение и распад нескольких конвективных ячеек.

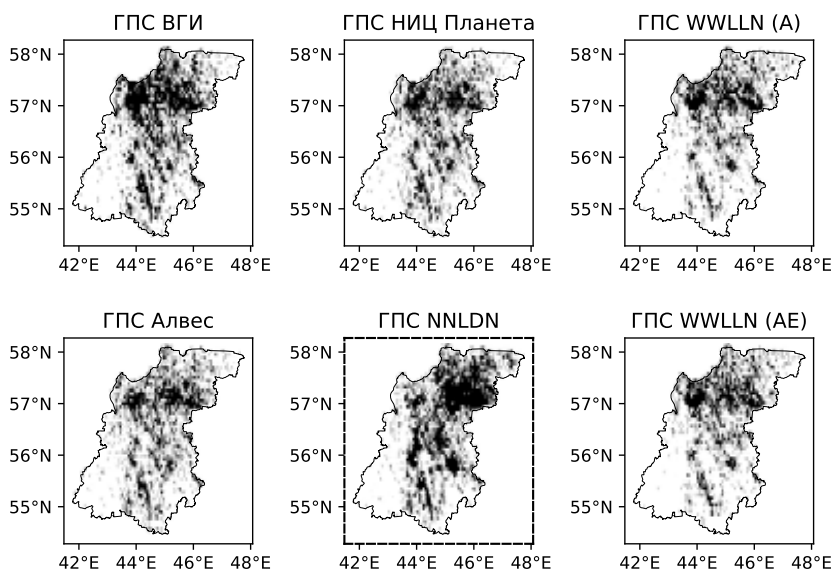


Рис. 11 — Гроза 29.07.2023 по данным различных грозопеленгационных сетей. На картах приведена нормированная плотность разрядов. NNLDN регистрирует больше слабых внутриоблачных разрядов

Анализ результатов регистрации сетью молниевой активности, совмещаемых с данными доплеровского метеорологического радиолокатора, позволил изучить статистику направления прихода гроз в грозовых сезонах 2022–2024 гг. (рис. 12). Для направления рассчитано количество грозовых часов, в течение которых гроза приходила с указанного направления в Нижегородскую область. Также рассмотрена сезонная изменчивость молниевой активности в регионе и получены пространственные паттерны распределения среднегодовой плотности молний, не превышающее 2 разряда на квадратный километр в год.

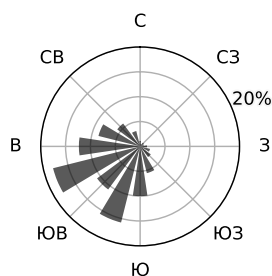


Рис. 12 — Статистика направления прихода гроз в области. Для каждого направления приведено количество грозовых часов в %

В разделе 3.3 представлены результаты анализа данных сети флюксометров (датчиков квазистатической напряжённости поля E_z), предназначенных для наблюдения полей как хорошей, так и грозовой погоды, расширенной и усовершенствованной автором в период с 2021 по 2025 г. Формализованы критерии хорошей погоды по значениям E_z , используемые для обработки антарктических и нижегородских измерений. Приведена статистика регистраций интенсивных электрически активных событий. Рассчитаны наблюдаемые величины поля хорошей погоды, изучены вариации на разных временных масштабах. Представлена новая методика выделения данных хорошей погоды, основанная на электростатических параметрах. Показано, что совмещение с данными грозопеленгационных сетей для ближних гроз позволяет дополнить статистику молниевых разрядов, определив тип и полярность разрядов.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертации.

Основные результаты

1. Рассмотрена постановка стационарной задачи о ГЭЦ постоянного тока. Показана единственность решения для скалярного потенциала, что соответствует единственности значения ионосферного потенциала при заданных источниках и проводимости. Реализован переход к двумерной модели, пригодной для численного моделирования. На базе известной параметризации электрически активных облаков разработан модуль расчёта стационарной ГЭЦ с учётом проводимости в климатической модели INMCM. Продемонстрировано согласие в моделях WRF и INMCM глобального распределения вкладов в ионосферный потенциал. Показано, как отличия погодной и климатической моделей влияют на используемые в параметризации источников конвективные параметры и их комбинации.

2. Рассмотрено глобальное влияние приземной температуры воздуха на формирование пространственного распределения вкладов в ионосферный потенциал. Продемонстрировано, что учёт приземной температуры приводит в согласие с наблюдениями сезонную вариацию, а учёт временного лага между максимумом температуры и максимумом глубокой конвекции улучшает и амплитудное, и фазовое согласие суточной вариации с наблюдениями.

3. Показано, что сезонная вариация ГЭЦ определяется перераспределением по широте количества электризованных облаков глубокой конвекции вслед за инсоляцией, а на суточном масштабе — с перераспределением по долготе вслед инсоляцией. Проанализирована динамика вкладов в ионосферный потенциал от отдельных регионов. По данным долговременных измерений напряжённости электрического поля E_z на антарктической

станции «Восток», отфильтрованных с использованием новых критериев хорошей погоды, определено, что сезонная вариация ГЭЦ достигает максимума летом Северного полушария.

4. Исследована стабильность наблюдаемых и моделируемых вариаций ГЭЦ. Показано, что амплитуда суточной вариации по данным скорректированных на локальную метеообстановку антарктических наблюдений E_z составляет 32%, а сезонной 16%, а моделирование ионосферного потенциала даёт близкие к этим значениям амплитуды 30% и 13% соответственно. С использованием новой параметризации изучен отклик ГЭЦ на аномалии конвекции, возникающие во время колебания Маддена — Джулиана и моды Эль-Ниньо — Южное колебание: показано статистически значимое изменение ионосферного потенциала, согласованное с антарктическими наблюдениями. Предложен метод измерения ионосферного потенциала для развития натурных наблюдений вариаций ГЭЦ.

5. Предложен метод кластеризации плотности разрядов молний, позволяющий оценивать плотность токов разделения заряда в грозовых облаках с использованием данных глобальной сети грозопеленгации. С помощью нового метода исследована связь грозовой активности с интенсивностью источников ГЭЦ постоянного тока на различных пространственно-временных масштабах. Показано, что метод позволяет хорошо воспроизводить изменчивость источников над сушей. Продемонстрировано воспроизведение суточного, сезонного паттернов и отклика ГЭЦ на колебание Маддена — Джулиана.

6. По данным измерений новых региональных грозопеленгационной и флюксометрической сетей изучены отдельные характеристики электрической активности в типичных грозовых облаках средних широт. Показано, что в зоне покрытия региональной сети преобладают фронтальные грозы, и оценены вероятности прихода гроз с отдельных направлений. Продемонстрирована возможность применения измерений напряжённости квазистатического электрического поля для определения полярности разрядов молний ближних гроз. Проанализированы характеристики и сезонная изменчивость регистрируемых интенсивных событий.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Slyunyaev N. N., Frank-Kamenetsky A. V., Ilin N. V., Sarafanov F. G., Shatalina M. V., Mareev E. A., Price C. G. Electric Field Measurements in the Antarctic Reveal Patterns Related to the El Niño—Southern Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48, № 21. P. e2021GL095389.
- A2. Kozlov A. V., Slyunyaev N. N., Ilin N. V., Sarafanov F. G., Frank-Kamenetsky A. V. The effect of the Madden–Julian Oscillation on the global electric circuit // *Atmos. Res.* 2023. Vol. 284. P. 106585.
- A3. Slyunyaev N. N., Sarafanov F. G., Ilin N. V., Mareev E. A., Volodin E. M., Frank-Kamenetsky A. V., Williams E. R. The seasonal variation of the direct current global electric circuit: 1. A new analysis based on long-term measurements in Antarctica // *J. Geophys. Res.* 2025. Vol. 130, № 6. P. e2024JD042633.
- A4. Slyunyaev N. N., Sarafanov F. G., Ilin N. V., Mareev E. A., Volodin E. M., Frank-Kamenetsky A. V., Williams E. R. The seasonal variation of the direct current global electric circuit: 2. Further analysis based on simulations // *J. Geophys. Res.* 2025. Vol. 130, № 8. P. e2024JD042634.
- A5. Сарафанов Ф. Г., Штаталина М. В., Шлюгаев Ю. В., Мареев Е. А. Современные системы локации молний: глобальные и региональные аспекты // *Фундаментальная и прикладная климатология.* 2024. Т. 10, № 1. С. 76—92.
- A6. Dementyeva S. O., Shatalina M. V., Kulikov M. Y., Sarafanov F. G., Mareev E. A. Trends and Features of Thunderstorms and Lightning Activity in the Upper Volga Region // *Atmos.* 2023. Vol. 14. P. 674.
- A7. Sarafanov F. G., Ilin N. V. Regional features of thunderstorm activity based on observations by the Nizhny Novgorod lightning detection network // *29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics.* 2023. Vol. 12780. P. 127805Z.
- A8. Штаталина М. В., Сарафанов Ф. Г., Шлюгаев Ю. В., Мареев Е. А. Особенности грозовой активности в Нижегородском регионе: наблюдения и анализ // *Физика атмосферы. Материалы XXX Международного симпозиума.* 2024. С. D215—D219.
- A9. Сарафанов Ф. Г., Ильин Н. В., Штаталина М. В. Универсальный критерий хорошей погоды в приземных измерениях электростатического поля атмосферы // *Глобальная электрическая цепь. Материалы Пятой Всероссийской конференции.* 2021. С. 87—88.

- A10. Сарафанов Ф. Г., Ильин Н. В. На пути к созданию датчика для измерения вертикального профиля электрического поля атмосферы // Глобальная электрическая цепь. Материалы Шестой Всероссийской конференции. 2023. С. 97–98.
- A11. Slyunyaev N. N., Ilin N. V., Mareev E. A., Sarafanov F. G., Kozlov A. V., Shatalina M. V., Frank-Kamenetsky A. V., Price C. G. Direct current global electric circuit and tropical modes of climate variability // XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. 2023.
- A12. Shlyugaev Y. V., Karashtin A. N., Sarafanov F. G., Shatalina M. V. Statistical Properties of Pulsed Radio Emission of Lightning Discharges with broadband registration // XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. 2023.
- A13. Слюняев Н. Н., Сарафанов Ф. Г. Моделирование глобальной электрической цепи переменного тока на основе данных о глобальной молниевой активности // Глобальная электрическая цепь. Материалы Шестой Всероссийской конференции. 2023. С. 10–11.
- A14. Богомолов В. В., Мареев Е. А., Шлюгаев Ю. В., Шаталина М. В., Сарафанов Ф. Г., Белов А. А., Иудин А. Ф., Климов П. А., Сараев Р. Е., Свертилов С. И., Яшин И. В. Результаты лабораторного моделирования молниевых разрядов на установке «Гроза ГИН-1МВ» // Глобальная электрическая цепь. Материалы Шестой Всероссийской конференции. 2023. С. 17–18.
- A15. Сарафанов Ф. Г., Слюняев Н. Н., Ильин Н. В. Динамика сезонной вариации глобальной электрической цепи в модели Земной системы // Нелинейные волны — 2024. Сборник докладов. 2024. С. 222–223.
- A16. Сарафанов Ф. Г., Кутерин Ф. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021668059. Логгер электрических полей для флюксометров Voltek EFM. Заявка №2021667353. Дата поступления 29 октября 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 ноября 2021 г.
- A17. Сарафанов Ф. Г., Микрюков П. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023667871. Клиент многопунктовой грозоопеленгационной сети. Заявка №2023667045 от 14.08.2023. Дата поступления 14 августа 2023 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 августа 2023 г.

- A18. Сарафанов Ф. Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025610621. Модуль расчета электрических параметров в атмосфере для модели Земной системы ИВМ РАН. Заявка №2024690429. Дата поступления 12 декабря 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 января 2025 г.
- A19. Ильин Н. В., Сарафанов Ф. Г. Патент РФ №2799385. Устройство для измерения высотного профиля квазистатического электрического поля атмосферы. Заявка № 2022134237. Дата поступления 26 декабря 2022 г. Зарегистрировано 5 июля 2023 г.

Список цитируемой литературы

1. Мареев Е. А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 5. С. 527—534.
2. Williams E. R., Mareev E. A. Recent progress on the global electrical circuit // Atmos. Res. 2014. Vol. 135–136. P. 208–227.
3. Rycroft M. J., Harrison R. G., Nicoll K. A., Mareev E. A. An overview of Earth's global electric circuit and atmospheric conductivity // Space Sci. Rev. 2008. Vol. 137, № 1–4. P. 83–105.
4. Rycroft M. J., Harrison R. G. AC/DC atmospheric global electric circuit phenomena // 2011 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium, URSIGASS 2011. 2011. P. 1–3.
5. Tinsley B. A., Zhou L. Initial Results of a Global Circuit Model with Variable Stratospheric and Tropospheric Aerosols // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111, № D16. P. D16205.
6. Tinsley B. A. The global atmospheric electric circuit and its effect on cloud microphysics // Rep. Prog. Phys. 2008. Vol. 71. P. 66801–31.
7. Смышляев С. П., Мареев Е. А., Галин В. Я. Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 4. С. 487—504.
8. Adlerman E. J., Williams E. R. Seasonal variation of the global electrical circuit // J. Geophys. Res. Atmos. 1996. Vol. 101, № D23. P. 29679–29688.
9. Harrison R. G., Bennett A. J. Cosmic ray and air conductivity profiles retrieved from early twentieth century balloon soundings of the lower troposphere // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2007. Vol. 69, № 4. P. 515–527.

10. Markson R., Ruhnke L. H., Williams E. R. Global Scale Comparison of Simultaneous Ionospheric Potential Measurements // *Atmos. Res.* 1999. Vol. 51, № 3/4. P. 315–321.
11. Markson R. The Global Circuit Intensity: Its Measurement and Variation over the Last 50 Years // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2007. Vol. 88, № 2. P. 223–241.
12. Имянитов И. М. Измерение электростатических полей в верхних слоях земной атмосферы // *Успехи физических наук.* 1957. Т. 63, № 9. С. 617–644.
13. Burns G. B., Frank-Kamenetsky A. V., Tinsley B. A., French W. J., Grigioni P., Camporeale G., Bering E. A. Atmospheric Global Circuit Variations from Vostok and Concordia Electric Field Measurements // *J. Atmos. Sci.* 2017. Vol. 74, № 3. P. 783–800.
14. Tacza J. C., Nicoll K. A., Macotela E. Periodicities in Fair Weather Potential Gradient Data from Multiple Stations at Different Latitudes // *Atmos. Res.* 2022. Vol. 276. P. 106250.
15. Harrison R. G., Ingram W. J. Air–Earth Current Measurements at Kew, London, 1909–1979 // *Atmos. Res.* 2005. Vol. 76, № 1–4. P. 49–64.
16. Retalis D. A. Study of the Air–Earth Electrical Current Density in Athens // *Pure Appl. Geophys.* 1991. Vol. 136, № 2/3. P. 217–233.
17. Harrison R. G. The Carnegie Curve // *Surv. Geophys.* 2013. Vol. 34, № 2. P. 209–232.
18. Harrison R. G., Nicoll K. A., Joshi M., Hawkins E. D. Empirical evidence for multidecadal scale global atmospheric electric circuit modulation by the El Niño–Southern Oscillation // *Environ. Res. Lett.* 2022. Vol. 17. P. 124048.
19. Siingh D., Singh R., Victor N. J., Kamra A. The DC and AC global electric circuits and climate // *Earth-Science Reviews.* 2023. Vol. 244. P. 104542.
20. Harrison R. G. A balloon-carried electrometer for high-resolution atmospheric electric field measurements in clouds // *Rev. Sci. Instrum.* 2001. Vol. 72. P. 2738–2741.
21. Mareev E. A., Volodin E. M. Variation of the global electric circuit and Ionospheric potential in a general circulation model // *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41, № 24. P. 9009–9016.

22. Lucas G. M., Baumgaertner A. J. G., Thayer J. P. A Global Electric Circuit Model within a Community Climate Model // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. Vol. 120, № 23. P. 12054–12066.
23. Slyunyaev N. N., Zhidkov A. A. On Parameterization of the Global Electric Circuit Generators // Radiophysics and Quantum Electronics. 2016. Vol. 59, № 3. P. 199–216.
24. Resnik M. D. Mathematics as a Science of Patterns. Oxford: Oxford University Press UK, 1997. P. 298.
25. Harrison R. G. The Global Atmospheric Electrical Circuit and Climate // Surv. Geophys. 2004. Vol. 25. P. 441–484.
26. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D. M., Huang X. Y. A Description of the Advanced Research WRF Version 4 // NCAR Technical Note. 2019. Vol. NCAR/TN-556+STR.
27. Volodin E. M. Simulation of Present-Day Climate with the INMCM60 Model // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2023. Vol. 59, № 1. P. 16–22.
28. Peterson M., Deierling W., Liu C., Mach D., Kalb C. A TRMM/GPM retrieval of the total mean generator current for the global electric circuit // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. Vol. 122, № 18. P. 10025–10049.
29. Hutchins M. L., Holzworth R. H., Brundell J. B. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. Vol. 119, № 1. P. 620–629.
30. Mezuman K., Price C. G., Galanti E. On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells // Environ. Res. Lett. 2014. Vol. 9. P. 124023.

Оглавление диссертации

Введение	4
Глава 1. Моделирование ГЭЦ постоянного тока	15
1.1 Теория ГЭЦ постоянного тока	19
1.1.1 Модельная задача	19
1.1.2 Аналитическое решение стационарной задачи	22
1.1.3 Единственность решения в стационарном случае	24
1.1.4 Переход к двумерной задаче	27
1.2 Параметризация двумерной задачи	30
1.2.1 Параметризация плотности стороннего тока	31
1.2.2 Параметризация профиля проводимости	39
1.3 Численная модель задачи с реальными источниками	46
1.3.1 С использованием модели прогноза погоды WRF	46
1.3.2 С использованием климатической модели INMCM	50
Глава 2. Пространственно-временные паттерны изменчивости ГЭЦ	54
2.1 Суточная вариация ионосферного потенциала	55
2.1.1 Воспроизведение суточной вариации в WRF и INMCM	55
2.1.2 Воспроизведение с учётом приземной температуры	65
2.2 Воздействие моды Эль-Ниньо – Южное колебание	72
2.2.1 Изменение формы суточной вариации	74
2.2.2 Временной сдвиг отклика регионов	80
2.3 Воздействие колебания Маддена — Джулиана	83
2.3.1 Пространственно-временная структура источников	84
2.3.2 Интегральное воздействие	88
2.4 Сезонная вариация ионосферного потенциала	91
2.4.1 Широтная структура сезонной вариации	98
2.4.2 Новая параметризация ионосферного потенциала	101
2.4.3 Суточно-сезонный паттерн	104
2.5 Об измерениях ионосферного потенциала	107
2.5.1 Технический облик нового датчика ИП	108

Глава 3. Глобальные и региональные паттерны молниевой активности в контексте наблюдения параметров ГЭЦ ...	114
3.1 Связь глобального распределения молний с ГЭЦ	116
3.1.1 Реконструкция суточной вариации ГЭЦ	117
3.1.2 Суточно-сезонный паттерн по наблюдениям молний ..	120
3.1.3 Колебание Маддена — Джулиана по наблюдениям молний	121
3.2 Сеть региональной грозопеленгации NNLDN	124
3.2.1 Моделирование точности обнаружения сетью NNLDN	125
3.2.2 Интенсивная гроза 29 июля 2023 года	129
3.2.3 Региональная статистика молниевой активности	132
3.3 Многопунктовые измерения квазистатических полей	136
3.3.1 Сеть электростатических флюксметров	136
3.3.2 Суточная вариация и критерии хорошей погоды	137
3.3.3 Определение полярности разрядов	142
Заключение	148
Список сокращений и условных обозначений	150
Список публикаций по теме диссертации	152
Список цитируемой литературы	155

САРАФАНОВ Федор Георгиевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПАТТЕРНЫ
ПАРАМЕТРОВ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ:
НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Автореферат

Подписано к печати 9.07.2025 г.

Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.

Тираж 100 экз. Заказ №22 (2025).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46