

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего**  
**образования «Национальный исследовательский Нижегородский**  
**государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)**

**Высшая школа общей и прикладной физики**

## **ГЛОБАЛЬНАЯ АТМОСФЕРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И КОЛЕБАНИЕ МАДДЕНА-ДЖУЛИАНА**

Выпускная квалификационная работа  
студента 4 курса по направлению  
подготовки 03.03.02 Физика,  
профиль – фундаментальная физика,  
Козлова Александра Владимировича

Научный руководитель:  
научный сотрудник ИПФ РАН,  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ Н.Н. Слюняев

Рецензент:  
научный сотрудник ИПФ РАН,  
доктор физико-математических наук

\_\_\_\_\_ М.Д. Токман

Декан ВШОПФ:  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ Е.Д. Господчиков

Нижний Новгород

2022 г.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>3</b>
<b>1. СТОЛБЦОВАЯ МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ</b>	<b>5</b>
<b>2. ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЯ МАДДЕНА–ДЖУЛИАНА НА ГЛОБАЛЬНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЦЕПЬ</b>	<b>6</b>
2.1. ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛЕБАНИЯ МАДДЕНА–ДЖУЛИАНА . . . . .	6
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>7</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В земной атмосфере протекают процессы, формирующие климат Земли, что делает изучение атмосферы критически важным для человека. Атмосферное электричество относится к числу наиболее актуальных направлений в науке, изучающей физику атмосферы Земли. Главной задачей атмосферного электричества является разработка не противоречащей эксперименту модели распределения крупномасштабного электрического поля в атмосфере планеты. Возможно, решение такой задачи позволит создать более точные климатические модели, учитывающие взаимодействие атмосферной динамики с электрическим окружением Земли.

Ключевым понятием атмосферного электричества является глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) [1]. ГЭЦ представляет собой распределённый токовый контур, образованный слоем воздуха между землёй и ионосферой. Выделяют два типа ГЭЦ: переменного тока и постоянного. В ГЭЦ первого типа источниками выступают молниевые разряды облако-земля, в ГЭЦ постоянного тока источниками являются токи разделения зарядов в облаках с развитой электрической структурой [1]. Всюду ниже будет рассматриваться ГЭЦ постоянного тока. Интенсивность ГЭЦ характеризуется ионосферным потенциалом (ИП), который определяется как разность потенциалов на ионосфере и на земле. Замечательной особенностью ИП является то, что он в первом приближении не зависит от географического места измерения. Однако, ИП в последние десятилетия не измеряется (из-за дороговизны таких измерений) и служит скорее для теоретического моделирования ГЭЦ. Экспериментально измеряется градиент потенциала (ГП) электрического поля Земли, который в дни хорошей погоды пропорционален ИП. ГП в отличие от ИП подвержен множеству локальных эффектов, модулирующих ГП и осложняющих интерпретацию результатов измерений.

ГЭЦ объединяет в себе области плохой погоды, где в среднем электрические токи поднимаются вверх от поверхности земли к ионосфере, и области хорошей погоды, где токи растекаются сверху вниз, поэтому ГЭЦ зависит от климатического состояния Земли. Кроме того, ГЭЦ подвержена влиянию таких факторов космического окружения, как галактические космические лучи и солнечная активность. Так же на ГЭЦ оказывают значительное влияние аэорозоли. Механизмы воздействия данных факторов на ГЭЦ до конца не ясны.

Аналитическое нахождение распределения крупномасштабных электрических полей в атмосфере в общем случае не возможно, поэтому для исследования ГЭЦ используется численное моделирование. При моделировании ГЭЦ значительные трудности возникают с заданием распределения источников и проводимости воздуха в атмосфере. Отчасти это связано с недостатком наблюдательных данных. Модели ГЭЦ разнятся по используемой геометрии, например, некоторые модели рассматривают атмосферу как сферический слой, а в некоторых атмосфера разбивается на невзаимодействующие столбцы воздуха (так называемая столбцовая модель ГЭЦ).

В первой части дипломной работы реализована столбцовая модель ГЭЦ с учётом параметризации проводимости, предложенной в [?]. Результаты такой модели сравнивались с результатами уже зарекомендовавшей себя модели, разработанной в [2], где используется более простое задание проводимости. На основе сопоставления моделей с двумя параметризациями

проводимости оценена надобность использования более сложной параметризации проводимости при моделировании ГЭЦ.

Во второй части дипломной работы исследовалась связь колебания Маддена–Джулиана (КМД) с ГЭЦ. КМД является доминирующей компонентой климатической изменчивости в тропиках на временных масштабах в десятки дней. КМД происходит нерегулярно и обычно длится 30–90 дней. Важным аспектом КМД является связанность процессов крупномасштабной атмосферной циркуляции и процессов глубокой конвекции; в течение каждого цикла КМД крупномасштабная связанная структура переносится на восток со скоростью  $5 \text{ м с}^{-1}$ . Данный эффект затрагивает все долготы, но наибольшее проявление имеет над Восточным полушарием. За последние 50 лет КМД было широко изучено с климатологической точки зрения [3, 4, 5]; было установлено, что КМД воздействует на глобальное распределение дождей, на развитие тропических циклонов и даже на Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК).

Однако, лишь несколько исследований было посвящено влиянию КМД на атмосферное электричество. В работе [6] показано на основе анализа спутниковых данных и измерений резонансов Шумана в Антарктике, что внутри-сезонная вариация глубокой конвекции отражается в вариации интенсивности шумановских резонансов. Резонансы Шумана возбуждаются молниевыми разрядами облако-земля, поэтому не удивительно, что изменение в глубокой конвекции (которая часто связана с молниевой активностью) отражается на их интенсивности. Ещё одно исследование по данной тематике [7] показывает, что интенсивность и частота резонансов Шумана коррелирует с индексами, описывающими КМД, но только в течение холодной фазы ЭНЮК.

Молниевая активность (а следовательно и шумановские резонансы) связаны с глубокой конвекцией лишь косвенно. Гораздо более натуральный подход заключается в рассмотрении ГЭЦ, источниками для которой служат квазистационарные токи разделения зарядов как в грозовых облаках, так и в ESC (electrified shower clouds), в которых нет молний; такие токи непосредственно связаны с глубокой конвекцией.

В недавних работах [8, 9] на основе моделирования ГЭЦ было показано, что изменения в глубокой конвекции в течение ЭНЮК модулирует ИП и его суточную вариацию. Результаты данных исследований нашли подтверждение в экспериментальных измерениях ГП [10, 11]. Похожий метод был применён в настоящей работе при исследовании связи ГЭЦ с КМД с использованием как результатов численного моделирования ГЭЦ, так и результатов измерений электрического поля в Антарктиде.

## **1. СТОЛБЦОВАЯ МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

## **2. ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЯ МАДДЕНА–ДЖУЛИАНА НА ГЛОБАЛЬНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЦЕПЬ**

### **2.1. ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛЕБАНИЯ МАДДЕНА–ДЖУЛИАНА**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] E. Williams and E. Mareev. Recent progress on the global electrical circuit. *Atmos. Res.*, 135–136:208–227, 2014.
- [2] N. V. Ilin, N. N. Slyunyaev, and E. A. Mareev. Toward a realistic representation of global electric circuit generators in models of atmospheric dynamics. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125(6):e2019JD032130, 2020.
- [3] R. A. Madden and P. R. Julian. Observations of the 40–50-day tropical oscillation—A review. *Mon. Wea. Rev.*, 122(5):814–837, 1994.
- [4] C. Zhang. Madden-Julian Oscillation. *Rev. Geophys.*, 43(2):RG2003, 2005.
- [5] C. Zhang, Á. F. Adames, B. Khouider, B. Wang, and D. Yang. Four theories of the Madden-Julian Oscillation. *Rev. Geophys.*, 58(3):e2019RG000685, 2020.
- [6] E. Anyamba, E. Williams, J. Susskind, A. Fraser-Smith, and M. Fullekrug. The manifestation of the Madden–Julian oscillation in global deep convection and in the Schumann resonance intensity. *J. Atmos. Sci.*, 57(8):1029–1044, 2000.
- [7] C. D. Beggan and M. A. Musur. Is the Madden–Julian Oscillation reliably detectable in Schumann Resonances? *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 190:108–116, 2019.
- [8] N. N. Slyunyaev, A. V. Frank-Kamenetsky, N. V. Ilin, F. G. Sarafanov, M. V. Shatalina, E. A. Mareev, and C. G. Price. Electric field measurements in the Antarctic reveal patterns related to the El Niño—Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 48(21):e2021GL095389, 2021.
- [9] N. N. Slyunyaev, N. V. Ilin, E. A. Mareev, and C. G. Price. The global electric circuit land–ocean response to the El Niño—Southern Oscillation. *Atmos. Res.*, 260:105626, 2021.
- [10] R. G. Harrison, M. Joshi, and K. Pascoe. Inferring convective responses to El Niño with atmospheric electricity measurements at Shetland. *Environ. Res. Lett.*, 6(4):044028, 2011.
- [11] N. N. Slyunyaev, N. V. Ilin, E. A. Mareev, and C. G. Price. A new link between El Niño—Southern Oscillation and atmospheric electricity. *Environ. Res. Lett.*, 16(4):044025, 2021.