



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПФ РАН,
академик РАН Г.Г. Денисов

«10» июля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Сарафанова Федора Георгиевича «Пространственно-временные паттерны параметров глобальной электрической цепи: наблюдения и моделирование» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Работа выполнена в отделе геофизической электродинамики (отд. 260) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Мареев Евгений Анатольевич, заведующий отделением геофизических исследований ИПФ РАН, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН.

В 2022 г. соискатель учёной степени окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" по направлению подготовки 03.04.03. Радиофизика.

Сроки обучения в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»: с 1 сентября 2022 года по 31 августа 2025 года.

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000028 от 10 июля 2025 года.

В период подготовки диссертации соискатель Сарафанов Федор Георгиевич работал младшим научным сотрудником в отделе физики атмосферы и микроволновой диагностики (отд. 240) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации

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.

Научная новизна и основные результаты диссертационного исследования

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 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 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 предложенный в работе метод позволяет хорошо воспроизводить изменчивость источников над сушей. Продemonстрировано 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. Продemonстрирована возможность применения измерений напряжённости квазистатического электрического поля для определения полярности разрядов молний ближних гроз. Проанализированы средние характеристики и сезонная изменчивость регистрируемых интенсивных событий.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Все представленные результаты диссертационного исследования являются достоверными и обоснованными. Для исследований использовались численные методы воспроизведения состояния атмосферы с часовым разрешением на базе признанных мировым научным сообществом модели прогноза погоды WRF и климатической модели INMCM. Результаты расчётов сравнивались с результатами натурных наблюдений. Изучение физических механизмов формирования откликов ГЭЦ на климатические моды велось с учётом исследований других авторов. Результаты исследований автора публиковались в высокорейтинговых рецензируемых изданиях, докладывались на всероссийских и международных симпозиумах, конференциях, школах и обсуждались на научных семинарах.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследования

Исследование пространственно-временных паттернов ГЭЦ постоянного тока с использованием численных методов совершенствует понимание механизмов формирования ГЭЦ: численная модель воспроизводит динамику и пространственное распределение электрической активности в атмосфере Земли, необходимые для теоретического объяснения связей между погодно-климатическим состоянием атмосферы и электрическими явлениями. Разработанные при исследовании связей ГЭЦ с климатическими модами методы изучения пространственной 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.

Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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
5. Сарафанов Ф. Г., Шаталина 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.
6. Dementyeva S. O., Shatalina M. V., Kulikov M. Yu., 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.

Высокий уровень публикаций в рецензируемых международных и отечественных журналах и награждение работы стипендией Президента РФ для аспирантов и адъюнктов подчеркивают научную ценность исследований диссертанта. Результаты исследований многократно обсуждались на разных конференциях, научных школах и семинарах. Результаты, представленные в диссертации, в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Формулировки результатов соответствуют личному вкладу автора в каждую из опубликованных статей. Ссылки на цитируемые источники оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.6.18. Науки об атмосфере и климате

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

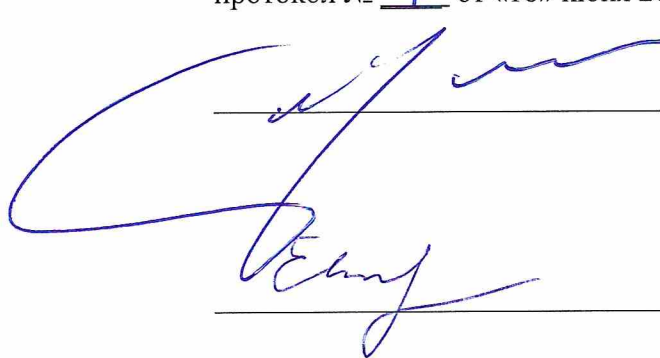
Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Пространственно-временные паттерны параметров глобальной электрической цепи: наблюдения и моделирование» Сарафанова Федора Георгиевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

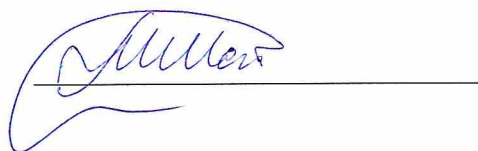
Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики ИПФ РАН по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Присутствовало на заседании 15 чел.

Результаты голосования: «за» – 15 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.
протокол № 7 от «18» июня 2025 г.



Глявин Михаил Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
заместитель директора ИПФ РАН,
Председатель заседания Ученого совета



Мареев Евгений Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
Председатель Ученого совета отделения
геофизических исследований и Центра
гидроакустики ИПФ РАН

Шаталина Мария Викторовна,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения геофизических
исследований и Центра гидроакустики,
научный сотрудник отдела 260