


Российская академия наук

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИВМ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института
вычислительной математики
Российской академии наук
член-корреспондент РАН



 Е.Е. Тыртышников
«26» сентября 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Слоняева Николая Николаевича

на тему «Теоретическое исследование структуры и динамики глобальной
электрической цепи»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертационная работа посвящена одной из ключевых глобальных проблем в области исследований атмосферного электричества - глобальной электрической цепи (ГЭЦ). В основе работы лежит теоретическое исследование принципов функционирования ГЭЦ и изменчивости её основных параметров под влиянием возмущений. Явление существования атмосферных электрических токов в проводящем контуре связывает в единую систему электрические явления в верхней атмосфере, верхнем слое океана и земной коре. Таким образом, исследование физических механизмов формирования ГЭЦ является важной задачей с точки зрения изучения этих связей, в том числе связи ионосферных и литосферных процессов (и задачи предсказания землетрясений в этом контексте), роли в геофизических электромагнитных процессах возмущений ионосферы (в том числе влияние таких внешних факторов, как солнечная активность, активность космических лучей, геомагнитные возмущения, высыпания частиц из магнитосферы и др.), а также значимости атмосферных процессов (в первую очередь связанных с образованием конвективной облачности и гроз) и изменений климата.

Актуальность работы определяется прежде всего сложностью, междисциплинарностью и недостаточной изученностью рассматриваемой проблемы. В связи с нехваткой накопленных рядов экспериментальных данных для систематического глобального исследования ГЭЦ, основой современной методологии исследований является математическое моделирование с использованием моделей различного уровня сложности, однако большинство современных моделей являются упрощенными или полумэмпирическими, при этом анализу математической постановки задачи математическим аспектам описания ГЭЦ до сих пор уделялось недостаточное внимание. Важными проблемами при моделировании ГЭЦ остаются проблема формулировки граничных условий на поверхности Земли и верхней границе атмосферы, а также более правильное описание внутренних источников (грозовых генераторов, позволяющих учитывать различные механизмы разделения зарядов, учитывать сложную структуру самих облаков). В то же время нужно отметить, что разработка численных моделей ГЭЦ является важной частью технологических работ по созданию современных моделей общей циркуляции атмосферы и моделей Земной системы, согласованно описывающих глобальные геофизические процессы различной природы. Исходя из этого, актуальность данного исследования не вызывает сомнений.

Основная задача работы обозначена как теоретическое исследование фундаментальных принципов функционирования ГЭЦ и динамики её основных параметров. По существу представленная работа опирается на точные и приближённые решения системы уравнения электродинамики для модельного описания структуры ГЭЦ в земной

атмосфере с переходом от общих постановок к конкретным прикладным задачам. Базовым подходом в представляемых к защите результатах исследований является математическое моделирование с использованием нескольких моделей (в частности, осесимметричная численная модель ГЭЦ и ее развитие в работе, приближённые контурные и эквивалентные модели ГЭЦ, основанные на пренебрежении горизонтальными токами) и сравнением их применимости и результатов в различных случаях. При этом работа сфокусирована на всестороннем рассмотрении модельных уравнений электромагнитных полей для ГЭЦ и соответствующих математических задач, с особым вниманием к нестационарным постановкам и их корректности, исследованию роли граничных условий, а также разработке параметризаций внутренних и граничных источников.

Структуру диссертации составляют введение, четыре главы, заключение, а также список литературы и два приложения. Во введении коротко представлена актуальность темы исследования и степень ее разработанности в научном сообществе, выделены основные задачи работы, её научная новизна и значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту, указаны основные методы исследования, коротко описано содержание диссертации и основные результаты.

Первая глава посвящена общей формулировке задачи о ГЭЦ и ее достаточно обстоятельному изложению с математической точки зрения. Приведен вывод системы уравнений для описания ГЭЦ из общих уравнений Максвелла в стационарном и квазистационарном случае, также выявлены особенности задачи, связанные с топологией атмосферы: наличие дополнительного интегрального соотношения, возможность определения ионосферного потенциала из решения уравнений. Основное содержание главы содержит рассмотрение задач о ГЭЦ при различных вариантах граничных условий на поверхности Земли и на внешней границе атмосферы (задание электрического потенциала; задание нормальной компоненты плотности полного тока; смешанные граничные условия; условие на внешней границе, связывающее потенциал и плотность полного тока в магнито-сопряжённых точках). В каждом из этих случаев выведена эквивалентная вариационная формулировка задачи, показана её корректность (существование и единственность решения, а также его непрерывная зависимость от параметров), доказана теорема о стабилизации. Математические подробности, соответствующие этим результатам, вынесены в Приложение А.

Во второй главе рассмотрены общие аспекты математического моделирования земной ГЭЦ в рамках сформулированных ранее постановок. Исследуются общие свойства уравнений электродинамики и модели разного уровня сложности, приводятся аналитические выражения для ионосферного потенциала в стационарном и нестационарном

случае, справедливые при некоторых предположениях о распределении проводимости. Исследуется возможность описания ГЭЦ в рамках плоскопараллельной геометрии и применимость такого подхода, а также с помощью многостолбцовых и электротехнических моделей, обсуждаются границы применимости такого описания, устанавливается связь между плоскопараллельными и сферическими моделями ГЭЦ.

Стоит отметить, что по изложению первых глав видно хорошее понимание автором ключевых особенностей постановки задачи о ГЭЦ, как с точки зрения математических аспектов, так и с точки зрения сложности условий реальной физической среды – геометрии атмосферы и условности границы слабопроводящей области ГЭЦ с ионосферой. В работе хорошо обоснована применимость каждого рассматриваемого конкретного подхода к описанию ГЭЦ при определенных условиях и предположениях.

Основную часть диссертационной работы составляет третья глава, описывающая формулировку и решение преимущественно конкретных прикладных задач, связанных с изменением основных характеристик ГЭЦ под действием возмущений проводимости и плотности стороннего тока (рассматриваемых в работе в качестве параметров грозовых генераторов). На основе простейшей модельной задачи о вкладе отдельного облака в ГЭЦ рассмотрены два основных подхода, применяющихся для решения таких задач и приведенных в предыдущей главе работы: численное моделирование и аналитические оценки (основанные на многостолбцовых моделях ГЭЦ и эквивалентных токовых контурах). Рассматриваются два сложившихся подхода к описанию внутренних источников ГЭЦ: подход, при котором они описываются как источники тока (также изложенный ранее в главах 1, 2), и подход, при котором они описываются как источники напряжения, методика применения которого для численной модели ГЭЦ является одним из новых значимых результатов данной работы. Также качественно рассматривается единая концепция описания источников ГЭЦ, включающая в себя два подхода как предельные случаи.

Особое внимание во второй части третьей главы уделено задачам о влиянии на ионосферный потенциал солнечной активности и возмущений проводимости в стратосфере. Исследуется связь между ионосферным потенциалом и полным током, текущим в ГЭЦ, а также приводятся оценки чувствительности ионосферного потенциала к возмущениям проводимости и интенсивности источников. Рассматриваются конкретные модельные задачи о влиянии понижения проводимости в облаке на его вклад в ГЭЦ, о динамике ионосферного потенциала при повышении радиоактивности в стратосфере (связанной с периодом масштабных испытаний ядерного оружия в 1950-е — 1960-е годы), а также о динамике параметров ГЭЦ под влиянием солнечной активности на разных временных масштабах.

Помимо проделанного объема работы определенным достоинством этой части работы является рассмотрение прикладных задач как с точки зрения математической корректности постановки и условий применимости (с использованием материала предыдущих глав), так и с точки зрения физической интерпретации и смысла разработанных методов и результатов (с отдельным сравнением с данными практических измерений).

Четвертая глава посвящена параметризации грозовых генераторов, применяемых в моделях ГЭЦ с источниками постоянного тока. Исследован общий вопрос о связи между распределениями плотности заряда и плотности стороннего тока внутри грозового облака в рамках одномерного описания и трёхмерной модели ГЭЦ. Показано, что на структуру распределения заряда внутри облака значительное влияние оказывает существенное изменение проводимости вблизи его границ. Обосновывается замена в моделях ГЭЦ реалистичных грозовых облаков на эквивалентные диполи; получена формула для нахождения эквивалентного тока, исследована степень её точности и применимости. Обсуждаются соотношения между основными параметрами ГЭЦ — ионосферным потенциалом, полным током и числом грозовых генераторов — с учётом неоднозначности параметризации её источников. Установлены основные факторы, определяющие вклад источников в ГЭЦ.

В заключении работы сформулированы основные научные результаты, наиболее важные из которых, по нашему мнению, заключаются в следующем:

- Для постановок стационарной и нестационарной задач о распределении квазистационарных электрических полей и токов в атмосфере Земли с учётом анизотропии проводимости в случае различных граничных условий доказаны математические утверждения о корректности соответствующих задач, получены их вариационные формулировки.
- Сформулированы формальные критерии применимости упрощённых многостолбцовых и контурных моделей ГЭЦ. Получены приближённые формулы для ионосферного потенциала.
- Показано, что широко известная гипотеза Марксона о связи между ионосферным потенциалом и ионизацией в атмосфере через возмущения проводимости может быть справедливой лишь при существенной зависимости стороннего тока грозовых генераторов от электрического поля (когда грозовые генераторы близки к источникам постоянного напряжения) и при существенном повышении проводимости под грозовыми облаками из-за коронного разряда.
- Рассмотрена связь между основными параметрами ГЭЦ — ионосферным потенциалом, полным током и числом грозовых генераторов — с учётом

неоднозначности параметризации её источников; установлены основные факторы, определяющие вклад источников в ГЭЦ. Проанализирована степень применимости приближения в моделях ГЭЦ реалистичных грозовых облаков эквивалентными диполями; получена формула для нахождения эквивалентного тока, исследована её точность.

Практическое значение проведённого в работе анализа прикладных задач и последних ~~звух~~ выделенных нами результатов работы определяется тем, что малое количество и несистематический характер имеющихся на сегодняшний день сведений о внутренних источниках-генераторах в ГЭЦ и о распределении проводимости в атмосфере не позволяют уверенно использовать простые аналитические оценки и модели, основанные на гипотезах.

Отдельно стоит отметить некоторую несогласованность изложения, особенно с точки зрения формулировки общей цели этой работы и ее достижения, а также упрощения некоторых систематизирующих выводов для прикладных задач на основе немногих рассмотренных простых аналитических подходов.

В качестве рекомендаций по использованию результатов и выводов диссертации, считаем целесообразным продолжить работу в направлении решения данной задачи в связи с ролью атмосферной циркуляции и ее изменчивости в формировании изменчивости характеристик ГЭЦ, в частности наблюдаемой межгодовой изменчивости ионосферного потенциала, подробно рассмотренной в разделе 3.6.

Общие замечания. Отмечая достоинства диссертационной работы, ее практическую значимость и научную новизну, следует указать на некоторые спорные положения и высказать замечания.

- Выбранная тема и название диссертации имеют достаточно широкую формулировку и не отражают конкретной решенной в представленной работе задачи, что нашло отражение и в недостаточно четкой формулировке единой цели исследования, определяющей стержень работы.
- В качестве общего недостатка основного содержания работы можно отметить тот факт, что личный вклад автора в решаемые задачи и полученные результаты недостаточно выделены по ходу общего изложения материала, что обычно следует делать при подготовке диссертации. Особенно это касается теоретической части работы, где например, в большинстве формулировок не видно разницы между изучением вопроса по литературе и исследованием, проведенным автором работы.
- По организации содержания первой и второй глав и приложений, не совсем ясно, почему некоторые из основных математических результатов данной работы

вынесены в приложение (не приведены хотя бы строгие формулировки без деталей доказательств).

- Не совсем понятно, какие из рассмотренного в главе 3 ряда гипотез для описания грозных генераторов, от выбора которых существенным образом зависят характеристики ГЭЦ, предполагаются наиболее близкими к реальности в рассматриваемых случаях и почему.
- Некоторые сделанные в главе 3 оценки и выводы о структуре ГЭЦ, зависимостях и чувствительностях ее характеристик и ионосферного потенциала от различных факторов, полученные на основе данных простых аналитических подходов и гипотез (разделы 3.4, 3.5, частично 3.6), хорошо было бы в каждом случае наглядно сравнивать с аналогичными результатами численного моделирования, частично представленными в последующих разделах, для количественной проверки и более глубокого анализа.
- Отметим, что изложение задачи влияния солнечной активности на динамику ионосферного потенциала (разделы 3.6, 3.7. и приложение Б) требует уточняющих пояснений. В частности, с самого начала (3.6.1) более подробно стоит пояснить, что солнечная активность в основном рассматривается через модуляцию и другие ее эффекты на потоки космических лучей, обычно не заменяющие собой обширное понятие ионизирующего излучения («излучение» в большей степени подразумевает поток фотонов, в том числе солнечное и другие виды излучения, которые не рассматриваются). В этой же связи при рассмотрении влияния солнечной вспышки (3.7.5) стоило бы предварительно конкретно пояснять, что подразумевается под этим понятием, т.е. какие характеристики вспышки рассматриваются в качестве возможных эффектов на ГЭЦ. Отдельно стоило сразу пояснить (в начале раздела 3.7.1), каким образом рассматривается в работе влияние 11-летнего солнечного цикла: какие конкретно параметры изменчивости солнечной активности скоррелированы со скоростью образования ионных пар на высотах стратосферы, на каком количественном уровне и в целом на каких основаниях это сделано и т.п. В частности отметим, что изложенная в приложении Б и рассматриваемая в разделе 3.7 параметризация изменчивости проводимости в течение 11-летнего солнечного цикла представляется нам достаточно грубой для изучения связи атмосферных процессов с солнечным циклом, поскольку в ней содержится целый ряд значительных допущений, а также не рассматриваются другие долгопериодные атмосферные процессы, которые могут оказывать значительное влияние на проводимость.

- По ходу работы часто используется общая формулировка «взаимодействие атмосферы и ионосферы» (подразумевающая согласованное описание всех процессов в среде с точки зрения холодной слабоионизированной плазмы) в более узком смысле рассмотрения этого вопроса с точки зрения атмосферного электричества и формирования электрических полей. Разница представляется принципиальной, поскольку взаимодействие атмосферы и ионосферы предполагает нахождение проводимости среды, что в рамках данной работы как раз не рассматривается.
- Несмотря на широкое использование результатов численного моделирования, в содержании работы подробно не обозначены вычислительные программные разработки и не описаны используемые технологические средства и пакеты для анализа данных и их вычислительно-программные характеристики. Это замечание можно рассматривать в качестве пожелания дальнейшей работы в этом направлении. Тем не менее, указанные недостатки можно считать незначительными, они не снижают ценности полученных результатов, а соответствующие замечания, как мы надеемся, будут полезны автору в дальнейшей работе.

Основные положения диссертации нашли отражение в публикациях автора, в том числе в ведущих отечественных и высокорейтинговых зарубежных журналах, что, несомненно, еще раз подчеркивает актуальность и новизну полученных результатов. Ключевые результаты обсуждались на всероссийских и международных конференциях, а также семинарах в ИПФ РАН, ИВМ РАН и других организациях.

Работа оформлена согласно требованиям, изложение очень хорошо структурировано и в целом представлено ясно и подробно, как в диссертации, так и в автореферате. Содержание диссертации соответствует содержанию автореферата. Работа в целом проведена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем формальным требованиям.

Заключение

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему, выполненную автором самостоятельно на высоком уровне, отвечающую требованиям ВАК. Тема диссертации соответствует научной специальности и даже несколько шире формальных рамок понятия «физика атмосферы» в силу специфики решаемых задач и охвата смежных дисциплин (таких как математический анализ и моделирование и др.).

Научные результаты и методологические разработки, полученные диссертантом, имеют существенное значение для российской науки в области исследований атмосферного

электричества и смежных физических процессов, в том числе для практического применения полученных оценок при экспериментальных исследованиях и реализации численных моделей глобальной электрической цепи в рамках перспективных моделей Земной системы. Полученные автором выводы достаточно обоснованы.


Представленная работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям с точки зрения актуальности, новизны и практической значимости полученных результатов, а ее автор, Слоняев Николай Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Диссертация рассмотрена на семинаре лаборатории «Моделирования климата и его изменений» ИВМ РАН, отзыв утвержден на заседании лаборатории по итогам семинара "08" сентября 2016 г., протокол № 2.

научный сотрудник, ФГБУН Институт вычислительной математики Российской Академии Наук (ИВМ РАН), 119333, Москва, ул. Губкина, дом 8, тел.: 8(495) 984-81-20#3904,
kulyamind@mail.ru

к.ф.-м.н.

Кулямин Дмитрий Вячеславович

 /Кулямин Д.В./

ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт вычислительной математики Российской Академии Наук (ИВМ РАН), 119333, Москва, ул. Губкина, дом 8, тел.: 8(495) 984-81-20#3904, volodin@inm.ras.ru

д.ф.-м.н., профессор РАН

Володин Евгений Михайлович

 /Володин Е.М./

Подписи Володина Е.М. и Кулямина Д.В. удостоверяю

Ученый секретарь ИВМ РАН, д.ф.-м.н.



 /В.П. Шутяев /