

ОТЗЫВ

официального оппонента по диссертации
Николая Николаевича Слюняева
«Теоретическое исследование структуры и динамики
глобальной электрической цепи»,
представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы

Диссертационная работа Н.Н. Слюняева посвящена теоретическому исследованию глобальной электрической цепи в атмосфере Земли. Глобальная электрическая цепь объединяет в себе различные процессы электрической природы, протекающие в атмосфере, а основной её составляющей является распределение электрических полей и токов, поддерживаемое разделением зарядов внутри грозовых облаков. Эта концепция позволяет рассматривать всю совокупность электрических явлений в атмосфере как единое целое и учитывать связи между распределением электрического поля в далёких друг от друга точках; при этом особое значение приобретает величина потенциала ионосферы относительно земной поверхности. В связи с появлением в последнее время ряда новых моделей глобальной электрической цепи её теоретическое изучение и моделирование представляется важной и актуальной задачей, а обсуждаемые в диссертации Н.Н. Слюняева вопросы представляют существенный интерес.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, двух приложений и списка литературы.

В первой главе рассматривается задача о глобальной электрической цепи с математической точки зрения. Уравнения, определяющие распределение полей и токов в атмосфере, рассматриваются в квазистационарном приближении (когда в уравнениях Максвелла сохраняется лишь производная по времени от электрического поля, а производная магнитного поля по времени отбрасывается); при переходе к описанию на языке электрического потенциала демонстрируется необходимость учёта дополнительного интегрального соотношения, связанного с особенностями геометрии земной атмосферы. Грозовые облака, поддерживающие функционирование глобальной цепи, описываются при этом как заданное распределение плотности тока разделения зарядов, дополняющей в законе Ома ток проводимости. Затем обсуждается математическая постановка задачи для потенциала при различных граничных условиях на поверхности Земли и на верхней границе атмосферы. В частности, рассматривается задание на границах электрического потенциала и нормальной компоненты полной плотности тока (включая ток смещения), анализируются особенности постановки задачи при различных комбинациях этих условий; при этом анализе проводимость предполагается, вообще говоря, анизотропной. Особо следует отметить возможность постановки на верхней границе атмосферы нестандартного граничного условия, обобщающего условие, предложенное в классической работе Хейса и Роубла (Hays, Roble, 1979): как

отмечено в диссертации, для пар магнито-сопряжённых точек можно задавать разность потенциалов и сумму нормальных компонент полной плотности тока.

Во второй главе рассматривается более конкретная задача с простейшими граничными условиями, когда на каждой из двух границ атмосферы потенциал предполагается постоянной величиной; источники глобальной цепи по-прежнему описываются как заданное распределение плотности стороннего тока. Для некоторых распределений проводимости приводятся формулы, посредством которых ионосферный потенциал может быть выражен аналитически через параметры задачи. Обсуждается возможность моделирования глобальной цепи в геометрии плоскопараллельного слоя (без учёта сферичности Земли); демонстрируется, что ионосферный потенциал в этом случае может быть найден лишь с помощью предельного перехода к сферической геометрии. Вторая глава завершается обсуждением применимости упрощённых контурных моделей глобальной электрической цепи; также выводятся общие приближённые выражения для ионосферного потенциала в рамках таких моделей.

В третьей главе рассматривается ряд задач, связанных с влиянием возмущений проводимости и параметров грозовых генераторов на динамику глобальной электрической цепи и ионосферного потенциала. При этом допускается не только описание грозовых облаков как заданного распределения плотности стороннего тока (в упрощённых схемах такому описанию соответствуют источники постоянного тока), но и другой подход, которому соответствуют источники постоянного напряжения. Эти два подхода интерпретируются в диссертационной работе как предельные случаи более общего описания, учитывающего зависимость тока от напряжённости электрического поля в грозовом облаке.

Два основных метода исследования, на которых базируются результаты третьей главы, составляют расчёты с помощью численной модели глобальной цепи в приближении осевой симметрии и моделировании грозовых облаков источниками постоянного тока и аналитические оценки с помощью эквивалентных контурных моделей. С помощью этих методов изучаются как общие закономерности функционирования глобальной электрической цепи (чувствительность ионосферного потенциала к возмущениям проводимости, связь между динамикой ионосферного потенциала и полного тока, текущего в цепи, влияние понижения проводимости в грозовых облаках на их вклад в глобальную цепь), так и конкретные модельные задачи (влияние на параметры глобальной цепи 11-летних солнечных циклов, солнечных вспышек и повышения радиоактивности в стратосфере в период интенсивных ядерных испытаний в 1950-х — 1960-х годах). Можно особо выделить задачу о динамике ионосферного потенциала на протяжении цикла солнечной активности, для моделирования которой была разработана новая параметризация атмосферной проводимости. Значительное внимание в третьей главе диссертации уделяется гипотезе Р. Марксона, утверждающей, что зафиксированное в экспериментах воздействие солнечной активности и повышенной радиоактивности на ионосферный потенциал связано только с

возмущениями проводимости в стратосфере; автор диссертации приходит к выводу, что для справедливости этой гипотезы необходимы существенная зависимость тока разделения зарядов в облаках от электрического поля и значительное повышение проводимости под грозовыми облаками из-за коронного разряда. В качестве другого возможного объяснения данных измерений в диссертации предлагается учитывать непосредственное влияние ионизирующего излучения на характеристики грозových генераторов.

Четвёртая глава посвящена исследованию особенностей параметризации грозových облаков при теоретическом анализе и моделировании глобальной цепи; грозových облака при этом снова описываются как источники постоянного тока. Обсуждается вопрос о связи распределений плотности заряда и плотности стороннего тока; демонстрируется, что понижение проводимости внутри грозového облака может давать вклад в его нижний положительный заряд. Рассматриваются также вопросы о замене облаков сложной структуры на эквивалентные токовые диполи и о соотношениях между основными характеристиками глобальной цепи — ионосферным потенциалом, полным током и числом источников, то есть грозových облаков.

К основным достижениям диссертационной работы следует отнести:

- достаточно строгую математическую постановку задачи о глобальной цепи в квазистационарном и стационарном случаях при различных граничных условиях, некоторые из которых рассмотрены в работе впервые;

- объединение традиционных упрощённых описаний грозových генераторов как источников постоянного тока и источников постоянного напряжения в рамках единой концепции стороннего тока, зависящего от электрического поля и интерпретация обоих описаний на языке распределённых моделей (для источников напряжения — впервые), что является первым шагом на пути к созданию моделей глобальной цепи, позволяющих учитывать источники общего вида

- последовательный анализ чувствительности ионосферного потенциала к возмущениям проводимости в стратосфере при различных предположениях об источниках и свойствах атмосферы в невозмущённом состоянии анализ области применимости гипотезы Марксона;

- новая параметризация проводимости в атмосфере и источников глобальной цепи.

Изложение в работе постановки задачи, методов анализа и основных результатов отличается логичностью, ясностью и полнотой в строгом стиле классической монографии.

В целом работа выполнена на высоком уровне и имеющиеся недочёты относятся в основном к деталям изложения.

Замечания по содержанию работы

В главе 2 желательно было бы более подробно обсудить область применимости используемой численной модели, указав временные и пространственные масштабы, на которых используются приближения не вносят существенных погрешностей и при первом использовании слова

«точные» по отношению к результатам модельных расчетов указать условность этого термина

В главе 3 при обсуждении зависимости ионосферного потенциала от фазы солнечного цикла было бы желательно дать более подробный обзор источников этих вариаций, включая возможности влияния солнечной активности на метеоусловия на разных широтах, существенную азимутальную асимметрию проводимости в верхней атмосфере и т.п.

Редакционные замечания по изложению материала

В целом язык работы очень хороший, но изредка в работе встречаются снижения стиля: «грубо говоря...» и т.п., которые несколько портят общее впечатление.

Результаты некоторых оценок и расчетов приводятся с неоправданной точностью, как «превышение на 211%».

Отмеченные недостатки не влияют на общее положительное впечатление от диссертации Н.Н. Слюняева. Диссертация является законченной научной работой на тему, важную для исследований атмосферного электричества. Результаты, полученные в диссертации, являются новыми и опубликованы в 4 статьях в рецензируемых российских и зарубежных журналах, а также в 8 работах в трудах и сборниках тезисов докладов российских и международных конференций; значительный личный вклад автора диссертации в эти публикации не вызывает сомнений.

Диссертация Н.Н. Слюняева соответствует требованиям положения о присуждении учёных степеней ВАК, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

23 сентября 2016 г.



Федоров Евгений Николаевич

123242, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1
e-mail: fedorov@ifz.ru тел. (499) 254 89 05

Подпись Е.Н. Федорова удостоверяю.
Учёный секретарь ИФЗ РАН
кандидат физико-математических наук



Погорелов Виталий Викторович