

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Пулинца Сергея Александровича на диссертационную работу Евтушенко Андрея Александровича «Исследование условий инициации, особенностей развития и глобального распределения высотных разрядов в атмосфере», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате.

Диссертационная работа посвящена исследованию сравнительно нового геофизического явления – высотных разрядов. В работе приведен исчерпывающий анализ актуального состояния исследований всех типов высотных разрядов и рассмотрены физические процессы в атмосфере, приводящие к их инициации. Основным объектом исследования выбран высотный разряд типа спрайт и в отдельных случаях дополнительно рассмотрен, тесно связанный с ним высотный разряд типа гало. В работе реализован комплексный подход к исследованию высотных разрядов: представлено численное моделирование воздействия спрайтов/гало на химический состав атмосферы в дневных и ночных условиях, численное моделирование глобального распределения плотности спрайтов по данным глобальной системы грозопеленгации WWLLN, лабораторное моделирование спрайтов на большой плазменной установке, реализованное при наличии градиента давления.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Общий объем работы 219 страниц, включая 104 рисунка и список литературы из 156 наименований.

Во введении освещается современное состояние рассматриваемых в диссертации проблем, обосновывается актуальность темы работы и ее практическая значимость, кратко излагается ее содержание, формулируются положения, выносимые на защиту. Приведено подробное обсуждение общепринятой классификации высотных разрядов с указанием их места и роли в глобальной электрической цепи. Произведен анализ доступных на сегодняшний момент экспериментальных данных и результатов численного/лабораторного моделирования высотных разрядов.

Первая глава посвящена исследованию влиянию спрайтов и гало на химический состав атмосферы. Представлена самосогласованная радиально-симметричная плазмохимическая модель для спрайта в ночных условиях и

для спрайта/гало в дневных условиях. Химический блок модели состоит из 250+ реакций для 50+ компонент и позволяет адекватно описать возмущение нейтралов, в том числе в возбужденном состоянии, ионов, включая ионы-связки, электронов и рассчитать интенсивность излучения разряда в основных полосах. С точки зрения количества реакций и химических компонент, модель занимает промежуточное значение: с одной стороны, она уже позволяет рассчитать достаточно подробно особенности воздействия импульсного электрического поля на мезосферу, а с другой стороны, не такая громоздкая и требующая очень больших вычислительных мощностей, как модели, содержащие несколько тысяч реакций. В работе одновременно моделируются процессы протекания электрического тока в тропосферном, так называемом родительском разряде, и возмущение поля в мезосфере, рассчитанное в дипольном приближении. Важнейшей особенностью модели является самосогласованный учет электрического поля, в результате которого существенно изменяющаяся в процессе разряда проводимость приводит к вытеснению электрического поля из центральной области разряда и формированию тороидальной структуры разряда.

Для ночного спрайта проведено моделирование на высотах 60-90 км при максимальном токе в молниевом канале 121,7 кА и максимальном импульсном дипольном моменте (ИДМ) 720 Кл·км. Показано, что в этом случае реализуются условия для инициации спрайта, приводящего к возмущению химического состава мезосферы (возмущение концентрации различных компонент достигают 198 см^{-3} для электронов, 135 см^{-3} для O_2^- , 105 см^{-3} для N_2^+ , и 255 см^{-3} для O_2^+) с радиальным размером до 40 км. Интенсивность излучения в $^1\text{PN}_2$ достигает $6,4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ и в $^2\text{PN}_2$ $1,35 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Время релаксации химического состава мезосферы от 10 с на 75 км до 10^3 с на 80–82 км.

Для дневного спрайта/гало проведено исследование возможных высот их инициации и сделаны выводы о необходимом ИДМ. Установлено, что характерная высота инициации разрядов определяется проводимостью атмосферы и смещена вниз на 20 км относительно ночных условий. При ИДМ 2750 Кл·км реализуются условия для инициации гало, когда характерные поля 80–100 Тд формируются на высоте 56–64 км и радиусом до 30 км, что приводит к быстрому прилипанию электронов к кислороду, падению проводимости на 2–4 порядка и излучению в $^1\text{PN}_2$ с интенсивностью до $3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, в $^2\text{PN}_2$ с интенсивностью до $0,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. При ИДМ 3750 Кл·км нормированное поле превышает 128 Тд достигается на высотах 56–64 км и радиусом 20 км, при этом создаются условия для лавинной ионизации.

Выяснено, что в пробойных полях концентрация электронов и O_2^- растет синхронно до 1400 см^{-3} и 1500 см^{-3} , что после вытеснения поля приводит к прилипанию электронов и росту концентрации O_2^- до 2800 см^{-3} к 4 мс на 62 км. Показано, что соотношение максимальных интенсивностей излучения в ${}^1\text{PN}_2/{}^2\text{PN}_2$ порядка 1,6 раза, при этом интенсивность в ${}^1\text{PN}_2$ достигает $8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Вторая глава описывает модель для описания плотности глобального распределения спрайтов с использованием данных глобальной грозопеленгационной сети WWLLN. На данный момент стало понятно, что спрайты не могут оказать сколь либо заметного влияния на химический состав мезосферы в глобальном масштабе, однако могут существенно возмутить химический баланс локально. Естественно встает вопрос о количестве спрайтов и частоте их инициации. Непосредственные наблюдения за разрядами глобально нельзя организовать в первую очередь по финансовым соображениям, поэтому актуальной является задача по развитию численных моделей. В диссертационной работе по данным сети WWLLN предложена цепочка параметризаций, связывающая пиковый ток с импульсным дипольным моментом и вероятностью инициации спрайта для положительных и отрицательных молниевых разрядов в тропосфере в ночных условиях. Показано, что среднее значение количества спрайтов в день около 870 или 0,6 спрайта в минуту, из них 58,6% над океаном и 41,4% над сушей при использовании данных за 2016 год. Главные зоны с высокой спрайтовой активностью наблюдаются в Карибском бассейне, Юго-Восточной Азии и над Африкой, спрайты очень редко встречаются в Северной Африке, Южной Атлантике и южной части Тихого океана, что соответствует оценкам, полученных при использовании спутниковых наблюдений. Сезонный всплеск спрайтовой активности, как, например, зимой у берегов Японии и осенью-зимой в бассейне Средиземного моря, соответствует данным натурных кампаний по наблюдению спрайтов. Отдельное внимание в работе уделено чувствительности модели в зависимости от предложенных параметризаций и качества исходных данных. Предложенная параметризация для исследования плотности спрайтов имеет широкий спектр применения в первую очередь для оценки перспектив организации натурных наблюдений в различных частях России и осуществления наиболее эффективного выбора точек наблюдения.

В третьей главе представлены результаты по лабораторному моделированию спрайтов на специально созданном в ИПФ РАН стенде «Спрайт». Показана возможность лабораторной реализации разряда при

наличии градиента давления, повторяющего структурные особенности и общие закономерности в развитии спрайта с сохранением безразмерных параметров. Экспериментальный стенд «Спрайт» представляет собой металлическую цилиндрическую вакуумную камеру длиной 2 м, диаметром 1,6 м, объемом около 4 м³, с подвешенными на изоляторах штыревым и дисковым электродах на расстоянии 80 см на оси камеры. Камера позволяет работать при давлениях от 10⁻⁵ Торр до атмосферного. Опытным путем было установлено, что в диапазоне 0,1–10 Торр становится возможным реализовать высокий перепад давления в межэлектродном промежутке посредством импульсного напуска рабочего газа с торцевой стороны камеры, сохранить дозвуковую скорость движения напускаемого газа и реализовать структуру разряда, характерную для спрайтов. Сама постановка эксперимента является уникальной, потому что удалось реализовать спрайт «целиком»: одновременно формируется диффузная, переходная и стримерная области разряда. В работе подробно обсуждается сравнение параметров лабораторного разряда с натурными данными для спрайта. Показано, что на лабораторной установке получен разряд, который по параметрам подобия для приведенного электрического поля, концентрации электронов, плотности тока, размеру филамент соответствует спрайту на высотах от 70 до 90 км.

В целом работа выполнена на высоком научном уровне, представленные результаты были доложены на профильных международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 15 статьях из перечня ВАК, из которых в 11 автор диссертации является первым автором. Каждая рассмотренная в диссертации задача является актуальной, а совместное использование полученных результатов позволяет глубже разобраться в физико-химических процессах, связанных с инициацией и развитием высотных разрядов.

Наиболее ценным результатом считаю создание экспериментальной установки позволившей смоделировать все области формирования разряда. Полученный экспериментальный результат подтверждает правильность используемой для моделирования теории спрайта.

Замечания относятся, в основном, к стилистике изложения. Считаю неудачными такие выражения как «концентрация возмущается до такой-то величины». Возмущаться может человек, а в работе следовало бы писать, что возмущение параметра достигает определенной величины.

Странной представляется также структура введения и его излишний объем. Фактически, в данной работе введение повторяет автореферат диссертации.

Тем не менее, сделанные замечания не снижают ценности работы, и как было сказано выше, относятся к оформлению работы.

Считаю, что диссертационная работа Евтушенко А.А. «Исследование условий инициации, особенностей развития и глобального распределения высотных разрядов в атмосфере», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, полностью соответствует требованиям ВАК, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате.

Официальный оппонент,
Пулинец Сергей Александрович
Доктор физико-математических наук
01.03.04. «Радиофизика»

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, +7(926) 235 91 17
pulse@cosmos.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований Российской академии наук» (ИКИ РАН)

Главный научный сотрудник



Пулинец С.А.

18.09.2023

Я, Пулинец Сергей Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Евтушенко Андрея Александровича, и их дальнейшую обработку.

18.09.2023



Пулинец С.А.

Подпись Пулинца Сергея Александровича удостоверяю.

Ученый секретарь ИКИ РАН
к.ф.-м.н. А.М. Садовский

