

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской академии наук, д.ф.-м.н., профессор, член-корр. РАН А.А. Петрукович



01.10.2021

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Свечниковой Екатерины Константиновны на тему

«Высокоэнергичные события в атмосфере и их связь с электрической структурой облака», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Диссертация Свечниковой Е.К. посвящена исследованию энергичного излучения электрифицированных облаков, выяснению механизмов и условий развития этого явления.

Актуальность темы исследования

Потоки энергичного излучения, состоящие преимущественно из электронов и гамма-квантов, создаваемые электрифицированными облаками, представляют одно из новейших направлений исследования в физике атмосферного электричества. Начало этому направлению было положено открытием гамма-вспышек земного происхождения (TGF) приборами BATSE (Burst and Transient Source Experiment) астрофизической лаборатории COMPTON в 1994 г. За неполных тридцать лет проведения всесторонних экспериментов поисковые работы привели к детальному пониманию спектра излучения и заложили основы теоретического описания процесса возникновения явления. Энергичное излучение облаков, направленное вниз к (TGE), было обнаружено с помощью наземных детекторов. TGF и TGE характеризуются различной длительностью: TGF – сотни микросекунд, TGE - от сотен миллисекунд до десятков минут. Различная длительность и направление излучения, а значит, и условия наблюдения – ключевые отличия явлений TGF и TGE. Общепризнанная основа механизма развития обоих явлений – лавинное размножение электронов, ускоряющихся в электрическом поле заряженного облака. Для описания динамики развития потоков частиц при TGF и TGE были предложены численные и аналитические модели, как правило ограничивающиеся приближением однородного электрического поля в облаке. Уточнение механизма образования потоков энергичного излучения, а также выяснение условий инициации излучения требуют определения свойств среды, в которой развивается излучение. Современные данные о строении облаков, производящих энергичное излучение, ограничиваются результатами исследования строения производящих TGF облаков на

основе спутниковых данных, что позволяет оценить плотность и распределение частиц воды в таких облаках и не характеризует распределение заряда в них. Между тем, заряд определяет распределение поля, в котором развиваются лавины убегающих электронов. Таким образом, определение строения и электрической структуры облаков, генераторов гамма-квантов и ускоренных электронов – актуальная задача в современной физике атмосферного электричества.

Цель диссертационной работы

Работа направлена на выяснение метеорологических свойств и электрической структуры облаков, создающих TGE – нисходящее энергичное излучение. Кроме того, поставлена цель создания аналитического описания динамики концентрации релятивистских убегающих электронов с возможностью описания механизма релятивистской обратной связи.

Значимость и новизна полученных результатов

Проанализированы данные регистрации явления TGE на Исследовательской Станции Арагац (Армения, 3200 м над у.м.), на основе чего получена оценка строения и состава облаков, создающих TGE. На Станции получен наибольший на настоящий момент набор экспериментальных данных о явлении TGE, что позволило построить оценку свойств, создающих TGE облаков на максимальной выборке, определить характерные свойства облаков и изучить их сезонную зависимость. Изучение строения облаков выполнено с помощью моделирования состояния атмосферы с помощью модели WRF, в ходе чего разработан метод верификации моделирования по радиолокационным данным, а также проведено исследование зависимости достоверности моделирования от параметров модели. Разработанный метод верификации и полученные закономерности обеспечения достоверности моделирования могут быть применены для верификации моделирования конвективных событий других типов, происходящих в других регионах. Разработана методика оценки электрической структуры облака на основе моделирования WRF и результатов наземных измерений электрического поля. Методика может быть применена для определения распределения заряда в облаках в различных регионах, что делает результат более значимым и расширяет сферу его применимости за пределы исследования высокоэнергичных событий. В процессе верификации моделирования, в том числе с применением результатов измерений электрического поля, показано, что учёт содержания аэрозольных частиц в воздухе при исследовании конвективных процессов в окрестностях горы Арагац можно пренебречь. Этот вывод можно использовать в качестве приближения при исследовании процессов образования облачности для произвольной высокогорной местности с низкими облаками, низкой облачностью и низким содержанием аэрозольных частиц.

Предложенная аналитическая модель динамики численности частиц в составе лавин релятивистских убегающих электронов является первым рассмотрением, сочетающим в себе учёт всех процессов, необходимых для реализации механизма релятивистской обратной связи, с простотой записи и наглядностью соотношения вкладов различных физических процессов в итоговую динамику лавин электронов.

Таким образом, впервые сделана оценка метеорологических свойств, строения и электрической структуры создающих TGE облаков, а также предложена наглядная аналитическая модель, описывающая развитие лавин релятивистских убегающих

электронов с учётом механизма релятивистской обратной связи, приводящая к оценке проводимости в области развития лавин. Предложенные автором методы и результаты являются новыми и представляют существенный интерес для дальнейшего развития физики энергичного излучения электрифицированных облаков.

Среди достоинств работы стоит также отметить, что автору удалось создать аналитическое описание развития потоков энергичных частиц в электрифицированных облаках в рамках модели лавин релятивистских убегающих электронов, в том числе с учётом релятивистской обратной связи. Предложенное аналитическое описание выгодно отличается от других моделей простотой и наглядным видом вклада отдельных физических процессов, что существенно расширяет возможности исследования квазистационарного режима потока энергичных частиц, допуская учёт специфики климатических и метеорологических условий.

Автореферат полностью отражает содержание, научные положения, выводы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость диссертации, содержит информацию об основных полученных научных результатах и позволяет сделать заключение о высоком научном уровне работы и научной квалификации соискателя.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с результатами измерений и с выводами независимых исследований. Достоверность оценки состава облака подтверждается применением широко используемой численной модели, результаты моделирования сопоставлены с данными наземных и спутниковых измерений, а также с данными метеорадара. Достоверность оценки электрической структуры облака подтверждается сравнением с данными измерений, внутренней согласованностью с результатами моделирования, а также качественным и количественным соответствием с результатами лабораторных исследований. Согласие с выводами независимых аналитических и численных описаний подтверждает корректность разработанной аналитической модели потоков энергичных частиц.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, включённых в перечень научных изданий ВАК, и 5 работ – в базе данных Web of Science.

Замечания

Диссертация не свободна от недостатков. Ниже приводятся некоторые из них.

1. Автор неоднократно отсылает к двум типичным явлениям в области высокоэнергичного излучения грозных облаков (TGF и TGE), и более того упоминает о схожем механизме генерации. Однако остается непонятным, каким образом один и тот же механизм приводит к совершенно разному по длительности и спектру излучению. Казалось бы, очевидное различие между двумя этими явлениями по типу облачного покрова – это их линейный размер, автором не рассматривается, а отсылка идет только к напряженности поля и высоте источника.

Стр. 110 *Более развитая зарядовая структура создающих TGF облаков приводит к более высоким значениям напряжённости электрического поля как вблизи поверхности земли, так и внутри облака, и, как следствие, может привести к более интенсивному лавинному размножению электронов и излучению гамма-квантов.*

Необходимо пояснить, как влияют линейные размеры (как вдоль, так и поперек вертикальной оси) на параметры лавин убегающих электронов в случае с положительной обратной связью, так и без, на оба этих явления.

2. Несколько спорно выглядит оценка повышения проводимости и максимального тока в электрических облаках за счет дополнительного вклада от убегающих электронов. Стр. 127 *Поэтому ток, переносимый всей совокупностью лавин в облаке, может принимать значения до 10^4 - 10^6 А*

Дело в том, что основная масса свободных электронов имеет малую энергию и не становится убегающими. Более того, такие частицы довольно быстро прилипают и не могут давать существенного вклада в ток. Локальное повышение электрического поля может приводить к коронным разрядам, которые также могут влиять на его «разрядку». Необходимо дать пояснения, какой вклад могут дать коронные разряды в оценки проводимости и как это скажется на полученных в работе результатах.

3. Из текста диссертации:

Отдельный интерес для дальнейшего рассмотрения представляет роль позитронов в развитии лавин релятивистских убегающих электронов, а также их возможное влияние на другие процессы в электрифицированных облаках.

следует, что автор видит позитронный вклад основным элементом положительной обратной связи для последующего развития лавин электронов. Представляется, что вклад позитронов сильно преувеличен и имеет смысл учитывать влияние только гамма-квантов на процессы электрификации облаков. Делались ли такие оценки?

4. Постановка задачи подразумевает исследование только крупномасштабных структур в грозовом облаке, однако в литературе имеются упоминания о сложной (иногда ее называют фрактальной) структуре облаков, что ближе к реальным наблюдениям. В таких неоднородных областях электрического поля доускорение частиц может происходить более эффективно. Возможно ли оценить этот эффект?

5. В работе также отмечены опечатки и непонятные символы.

Например, стр.82 и стр.94 слова разделяются двойным слешем: *«при взаимодействии с частицами снега//льда»*

Стр.84 «Пространственное распределение плотности массы m_j путём моделирования WRF найдено в виде значений в узлах сетки с шагом 1 км по горизонтальным координатам...». Скорее всего имелось в виду «1 км».

Стр.92 «**Объёмная** плотность заряда равна примерно»

