



*На правах рукописи*

СВЕЧНИКОВА Екатерина Константиновна

**ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ СОБЫТИЯ В АТМОСФЕРЕ  
И ИХ СВЯЗЬ  
С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ОБЛАКА**

01.04.03 – радиопизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: Мареев Евгений Анатольевич, доктор физико-математических наук, член-корр. РАН, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Свертилов Сергей Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова;

Гавриленко Владимир Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

Защита состоится 18 октября 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 при ИПФ РАН, 603950 г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте [rfra.n.ru](http://rfra.n.ru) ФБГНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Автореферат разослан 2 августа 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Грозовые события, происходящие в атмосфере Земли, являются источником потоков электронов, излучающих фотоны с энергией от долей до сотен МэВ, которые могут быть зарегистрированы как на поверхности Земли, так и на высоте 450–550 км [1]. Механизм энергичного излучения облаков ещё мало изучен, что связано с недостатком сведений о физических свойствах облаков, создающих энергичное излучение. Интерес представляют и метеорологические характеристики, и распределение заряда в облаке. Совокупный анализ этих свойств способен дать новую информацию о механизмах развития энергичного излучения и процессах разделения заряда в облаке.

Изучение энергичных атмосферных событий началось с открытия в 1994 году гамма-вспышек земного происхождения (terrestrial gamma-ray flashes, TGF) по результатам регистрации детектором BATSE (the Burst and Transient Source Experiment) спутника Compton Gamma Ray Observatory всплеска излучения фотонов с энергией 10 кэВ–100 МэВ длительностью 1–100 мкс [2]. Основная часть наблюдательных данных о TGF сейчас получена благодаря детекторам космических аппаратов (BATSE, Reuven Ramaty High Energy Spectroscopic Imager (RHESSI), AGILE (Astro rivelatore Gamma a Immagini LEggero), The Fermi Gamma-Ray Burst Monitor), созданным для регистрации гамма-излучения космических источников.

Явление увеличения потока энергичных частиц под грозовыми облаками (thunderstorm ground enhancement, TGE) впервые было обнаружено и активно изучается с помощью оборудования Исследовательской Станции Арагац. Увеличение потока наблюдается для электронов и фотонов с энергией 3–100 МэВ и имеет характерную длительность от долей секунды до нескольких минут [3]. Станция Арагац Отдела космических лучей Ереванского физического института расположена на высоте 3200 м над уровнем моря (40°28'N, 44°10'E), на склоне горы Арагац на северо-западе Армении, примерно в 50 км от Еревана. Станция Арагац является основным местом наблюдения TGE, обеспечивая подавляющее большинство измерений параметров TGE.

TGE и TGF возникают в результате развития потоков энергичных частиц в электрическом поле грозового облака. Электрическая структура облака может быть приближена чередованием областей, где поле направлено вверх и вниз [4], электроны ускоряются по направлению вниз и вверх соответственно. Энергичные электроны, движущиеся вверх, приводят к возникновению TGF. Направленные к земле потоки регистрируются как TGE. Общие черты явлений TGF и TGE позволяет изучать их сходными методами, ограничения применимости которых определяются спецификой условий наблюдения. Совместное рассмотрение физических свойств облаков, создающих TGF и TGE, способствует созданию общей картины связи параметров грозовых систем с вероятностью возникновения высокоэнергичных явлений.

## **Цели и задачи диссертационной работы:**

Настоящее исследование посвящено определению свойств облаков, создающих потоки энергичных частиц, а также разработке моделей, описывающих это явление. Работа направлена на решение следующих задач:

1. Определение строения и метеорологических свойств облаков, создающих нисходящее гамма-излучение (TGE).
2. Определение электрической структуры облаков, создающих TGE.
3. Разработка аналитического описания развития потоков энергичных частиц в электрифицированных облаках в рамках модели лавин релятивистских убегающих электронов с учётом релятивистской обратной связи.

## **Научная и практическая значимость**

Выяснение закономерностей развития гамма-излучения облаков необходимо для понимания фундаментальных процессов, протекающих в электрифицированных облаках, а также обеспечивает новые возможности прогноза, в том числе – прогноза молниевой активности и событий энергичного излучения. Практическая значимость включает также возможность оценки влияния порождаемых облаками энергичных частиц на наземные объекты и на оборудование и экипаж летательных аппаратов.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется новыми методами исследования и оригинальными результатами, полученными впервые:

1. Впервые найдены строение и структура конвективных событий, сопровождавшихся TGE, наблюдавшихся на Станции Арагац, для чего осуществлено численное моделирование состояния атмосферы с помощью Weather Research and Forecasting Model. Определены параметры моделирования, позволяющие наиболее достоверно описывать облака, создающие TGE.
2. Разработана методика оценки электрической структуры облака по результатам приземных измерений электрического поля и с помощью моделирования состояния атмосферы.
3. Определены характерные свойства электрической структуры создающих TGE облаков.
4. Создано 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.
5. Разработана методика оценки распределения заряда в облаке, создающем TGE, на основе результатов приземных измерений напряжённости электрического поля и потока энергичных частиц.

## Положения, выносимые на защиту

1. Моделирование с помощью Weather Research and Forecasting Model позволяет получить новые сведения о метеорологических свойствах облаков, создающих нисходящие потоки энергичных частиц (thunderstorm ground enhancement, TGE). Применение результатов наблюдений на Станции Арагац позволило определить набор параметров моделирования, обеспечивающий наилучшую достоверность.

2. Облака, создающие события TGE, наблюдаемые на высокогорной станции, состоят преимущественно из частиц снежной крупы и снега и часто имеют двухслойную структуру. Типичные высоты слоёв над поверхностью земли лежат в диапазоне 1–3 км для нижнего слоя и 4–7 км для верхнего. Характерные значения плотности массы:  $0.01\text{--}1 \text{ г/м}^3$  для скопления частиц снежной крупы и  $0.3\text{--}2 \text{ г/м}^3$  для скопления частиц снега.

3. С помощью разработанной методики оценки электрической структуры определены характерные свойства облаков, создающих интенсивные события TGE. В результате исследования событий TGE, наблюдавшихся на Станции Арагац в 2011–2020 годах, показано, что многие интенсивные события TGE созданы облаками с двумя слоями заряда: нижним положительным и верхним отрицательным. Основными носителями заряда в высокогорных условиях являются частицы снега и снежной крупы. Характерная плотность заряда:  $0.001\text{--}1 \text{ нКл/м}^3$ . Плотность заряда на единицу массы:  $0.001\text{--}1 \text{ нКл/г}$ .

4. Развитие электронных лавин может существенно повысить проводимость среды, что показано с применением разработанной аналитической модели развития лавин убегающих электронов. Оценка плотности заряда в облаке, выполненная с использованием измеренных значений приземного потока частиц, даёт более высокие значения, чем оценка с применением только измерений приземного электрического поля. Этот факт может свидетельствовать о существенном влиянии неоднородности электрического поля для развития лавин убегающих электронов.

## Апробация результатов

Основные результаты диссертации представлены на конференциях: на Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле EGU2020 и EGU-2021 (Online, 2020, 2021), на XXXIII Генеральной Ассамблее Международного Союза Radio Science (URSI) (Online, 2020), на 27й Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики IUGG2019 (Монреаль, Канада, 2019), на международном симпозиуме “Thunderstorm and Energetic Particles Acceleration” (TEPA) (Бюракан, Армения, 2018, 2019), на VI Международной конференции “Frontiers of Nonlinear Physics” (Нижний Новгород, Россия, 2016), на Всероссийской конференции молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты” (Н. Новгород, 2016);

докладывались на внутренних семинарах ИПФ РАН и конкурсе молодых ученых ИПФ РАН 2020 года.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 9 работ [A1–A9], из которых 6 статей в рецензируемых журналах, включенных в перечень научных изданий ВАК [A1–A6].

### **Личный вклад автора в проведенные исследования**

Все результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из четырех глав, Введения и Заключения. Объем диссертации составляет 155 страниц и включает 50 рисунков и 7 таблиц. Список литературы состоит из 137 наименований, включая 9 [A1–A9] публикаций автора по теме диссертации в рецензируемых журналах.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Глава 1** является вводной. В ней рассмотрены основные модели образования гамма-излучения электрифицированными облаками: механизм убегания электронов, модель лавин релятивистских убегających электронов, модель молниевго лидера, модель лавин с обратной связью. Сравнение следствий моделей с результатами измерений сформировало общепринятое представление о том, что энергичное излучение облаков создается лавинами убегających электронов, при этом роль обратной связи в динамике лавин и генерации излучения остаётся неясной [1].

**Раздел 1.1** описывает явление убегания электронов, на котором основаны все обсуждаемые модели возникновения гамма-излучения. Убегающими называются электроны, движущиеся в электрическом поле в воздухе, для которых увеличение энергии под влиянием электрического поля превышает потери энергии при взаимодействии с воздухом [5]. Для убегания электронов необходимо электрическое поле напряжённости не менее  $2.8 \cdot 10^5 \text{ В/м} \times n$  (где  $n$  – плотность воздуха относительно её значения на уровне моря при нормальных условиях [6], что близко к максимальному значению напряжённости электрического поля, измеренному в облаке [7]). При напряжённости более  $3 \cdot 10^7 \text{ В/м} \times n$ , электроны любых энергий становятся убегающими [5] – происходит термический, или холодный пробой. Холодный пробой считается механизмом, ответственным за рентгеновское излучение, сопровождающее молниевые разряды типа облако-земля.

**Раздел 1.2** посвящён модели лавин релятивистских убегающих электронов (relativistic runaway electron avalanche, RREA), основанной на идее о создании каждым убегающим электроном новых энергичных электронов [1]. Убегающие электроны ионизируют воздух, производя вторичные электроны, некоторые из которых обладают достаточной для убегания энергией. Поэтому количество быстрых электронов в поле с напряжённостью более  $2.84 \cdot 10^5$  В/м  $\times n$  будет экспоненциально возрастать со временем и пройденным ими расстоянием [1]. Модель молниевых лидеров – альтернативная возможность развития гамма-излучения грозовых облаков, предполагающая тормозное происхождение излучения от электронов, ускоренных в локальном сильном электрическом поле молниевых лидеров.

**Раздел 1.3** содержит описание модели разряда с релятивистской обратной связью, учитывающей возможность резкого увеличения количества лавин в результате процессов с участием позитронов и энергичных квантов, которые образуются при развитии исходной лавины [8]. Эти частицы способны распространяться к началу области, пригодной для существования лавин, и там производить новые высокоэнергичные электроны, инициирующие новые лавины. Обратная связь может сильно увеличить количество энергичных электронов в конце лавины, благодаря чему развитие лавин может стать самоподдерживающимся.

**Глава 2** посвящена явлению TGE (направленное вниз гамма-излучение облаков) и методам его исследования [A1–A4]. Увеличение приземного потока энергичных фотонов и электронов под грозовыми облаками (thunderstorm ground enhancement, TGE) наблюдается при прохождении электрифицированных облаков над местом наблюдения и имеет длительность от долей секунды до десятков минут. Увеличение потока электронов и фотонов с энергией 3–100 МэВ относительно фонового значения обычно составляет единицы процентов, достигая десятков процентов для отдельных событий [9].

В **Разделе 2.1** описаны основные свойства явления TGE, приведён краткий обзор наблюдения TGE в различных географических и климатических условиях [A3]. Наблюдению TGE благоприятствует малая высота облаков над поверхностью земли, поэтому для наблюдения TGE удобны условия высокогорья или местности, где характерная высота основания облака не превышает 1–2 км [10–14]. Наиболее обширный набор данных о TGE получен на Исследовательской Станции Арагац и положен в основу данной работы.

В **Разделе 2.2** приводятся характеристики измерительной аппаратуры, применяемой для изучения TGE на Станции Арагац [15, 16]. Все данные о приземном значении электрического поля и потока энергичных частиц, использованные в данном исследовании, взяты из открытого архива результатов измерений [17]. Уникальные свойства Станции Арагац – высокогорное расположение (3200 м над уровнем моря) и наличие обширного комплекса измерительных приборов, включая детекторы энергичных частиц, успешно применяющиеся для исследования космических лучей и их преобразования обла-

ками земной атмосферы. Основные приборы, обеспечивающие сведения о потоке частиц – детектор на основе кристаллов NaI(Tl) и детектор Stand-3 на основе пластикового сцинтиллятора. Использование детекторов различных типов необходимо для определения состава и энергетических свойств потока энергичных частиц, попадающего на детекторы. Основная часть отклика детектора на основе NaI(Tl) обусловлена принимаемым гамма-излучением, при этом для фотонов и электронов с энергией более 10 МэВ вероятность регистрации превышает 50%. Выполненное с помощью GEANT4 численное моделирование процесса взаимодействия энергичных частиц с детектором на основе NaI(Tl) позволяет определить состав потока частиц, падающих на детектор, по его отклику (относительное содержание электронов и фотонов). Показано, что взаимодействие электронов с алюминиевым покрытием детектора приводит к излучению фотонов, регистрируемых рабочим веществом детектора. Детектор Stand-3 на основе пластикового сцинтиллятора имеет нижний энергетический порог регистрации гамма-квантов 3 МэВ, потому не чувствителен к излучению продуктов распада радона и является основным инструментом исследования излучения TGE.

Раздел 2.3 описывает результаты наблюдений TGE на Станции. Приведены сведения и рассуждения, необходимые для анализа физических свойств создающих TGE облаков, представленного в следующих главах. За 2016–2017 годы на Станции Арагац наблюдалось более двух сотен событий TGE [18]. TGE наблюдаются преимущественно в мае и июне. Превышение потоком электронов и фотонов фонового значения для большинства событий находится в пределах 10%, в редких случаях приближаясь к 100%. Динамика приземной напряжённости электрического поля, регистрируемая при движении облака над местом наблюдения, позволяет сформулировать предварительное суждение об электрической структуре облака, создающего TGE: нередко увеличение потока частиц сопровождается увеличением компоненты приземного поля, направленной вверх, что приводит к предположению о важности нижнего положительно-заряженного слоя облака для развития TGE.

**Раздел 2.4** содержит краткий обзор методов изучения состава, строения и электрической структуры облаков. Самолётные и зондовые измерения привели к формированию общего представления о составе и строении облаков, что сводится к следующему. Облака состоят из водных частиц, называемых гидрометеорами (жидких и твёрдых), а также из примесных частиц – аэрозолей, с размерами 1 нм–100 мкм. Характерная плотность кучево-дождевого облака около  $0.5 \text{ г/м}^3$  [19]. Самолётные измерения характеризуют главным образом латеральную структуру облака, зондовые измерения позволяют определить высотные профили физических характеристик. Спутниковые наблюдения в оптическом и ИК-диапазонах (METEOSAT, The Tropical Rainfall Measuring Mission) обеспечивают сведения о температуре и размерах облачных частиц и сводятся в основном к описанию верхней части слоя облачности, имея при этом шаг по горизонтальной координате 20 км и более и шаг по времени 0.5 часа и более.

Измерения радиолокационной отражаемости обеспечивают более высокое пространственное и временное разрешение по сравнению со спутниковыми данными (порядка 1 км и 5 мин). Радарные измерения позволяют обнаружить лишь крупные гидрометеоры (крупнее примерно 50 мкм), что затрудняет исследование электрических свойств облака, потому что плотность заряда мелких водных частиц (1–10 мкм) может быть сопоставима с плотностью заряда на более крупных гидрометеорах (10–40 мкм) [20]. Кроме того, радарная отражаемость является интегральной характеристикой и не обеспечивает информации о распределении отдельных видов гидрометеоров. Радарные и спутниковые данные, наряду с результатами наземных измерений, применены в настоящем исследовании для верификации результатов моделирования состояния атмосферы [A1].

**Раздел 2.5** содержит классификацию численных моделей прогноза состояния атмосферы. Стремительное развитие методов численного моделирования в последние десятилетия сделало его важным инструментом исследования атмосферных явлений [21]. Численное моделирование может применяться в качестве дополнения к сведениям, полученным путём измерений, благодаря возможности получения информации обо всём объёме облака на протяжении нескольких часов его эволюции. Недостатком численного моделирования является необходимость тщательного определения параметров модели, что применительно к поставленной задаче описано далее.

**Раздел 2.6** посвящён применённой в настоящем исследовании модели The Weather Research and Forecasting model (WRF-ARW, v. 4.1.2) [22]. Модель WRF – система численного моделирования атмосферных явлений и прогноза погоды, основанная на решении негидростатических уравнений Эйлера для сжимаемой жидкости. WRF широко применяется для исследовательских и прогностических приложений благодаря открытому доступу и централизованной поддержке. В ходе работы с помощью моделирования WRF установлены метеорологические характеристики облаков, создающих TGE (распределение температуры, давления, скорости ветра; плотность и гидрометеорный состав) [A2-A3]. Для определения электрической структуры облака на основе результатов моделирования WRF разработана оригинальная методика, представленная в разделе 3.5 [A1].

**Раздел 2.7** описывает критерии и результаты выбора параметров моделирования для изучения конвективных явлений в регионе Арагац с помощью модели WRF [A1]. Моделирование выполнено с применением стратегии двух вложенных областей, с центром в месте расположения Станции. Внешний домен с размерами 2700×1800 км имеет шаг сетки по горизонтальной координате 3 км. Внутренний домен с размерами 90×90 км с шагом 1 км детально воспроизводит окрестности горы Арагац. Вертикальная координата внутреннего домена задана нерегулярной сеткой из 41 уровня, шаг дискретизации составляет около 50 м над земной поверхностью, возрастая до 600 м с увеличением высоты до 20 км. В качестве начальных и граничных условий исполь-

зовались данные реанализа NCEP GFS 0.25 Degree, без ассимиляции региональных метеоданных. Погрешность моделирования параметров атмосферы, выполненного в рамках данного исследования, оценена как 20%. Погрешность описания конвективных событий составляет около 10–20 минут, так как максимальный временной шаг совокупности параметризуемых физических процессов составляет 10 минут (периодичность вызова блока радиационной физики) [23]. Типичное значение приземной горизонтальной скорости ветра составляет 3–8 м/с, то есть за 20 минут облако перемещается на 1–2 км по горизонтали.

Наиболее трудоёмкая часть выбора параметров моделирования – выбор способа описания микрофизических процессов. Микрофизическая схема (параметризация) являет собой совокупность соотношений, определяющих скорость возникновения и исчезновения водных частиц каждого типа. Твёрдые гидрометеоры являются основными носителями заряда в облаке, поэтому при выборе микрофизической схемы следует стремиться к описанию большего количества видов твёрдых гидрометеоров. Для определения параметров моделирования, обеспечивающих наибольшую его достоверность, выполнена верификация результатов моделирования: сопоставление промоделированной и измеренной динамики приземных значений температуры и давления, сравнение промоделированных значений высоты и температуры верхней кромки облака с данными спутниковых наблюдений, сравнение результатов моделирования радиолокационной отражаемости с данными метеорадара, сравнение промоделированной и измеренной динамики приповерхностной напряжённости электрического поля (на основе оценки распределения заряда в облаке). Поскольку моделирование состояния атмосферы выполняется без использования сведений о распределении заряда, восстановление динамики приземной напряжённости электрического поля обеспечивает независимую оценку достоверности моделирования.

В результате верификации моделирования установлено, что для корректного описания конвективного явления следует инициализировать модель в момент, на 6-8 часов предшествующий интересующему событию. Выполнено сравнение результатов моделирования, полученных с использованием следующих микрофизических схем: Kessler, Lin (Purdue), WSM3, WSM6, Thompson-2008 [24], Morrison, Thompson Aerosol-Aware [25]. Результаты верификации, а также сформулированный выше критерий – точность в описании твёрдых водяных частиц и высокое пространственное разрешение – приводят к выбору в качестве одной из наиболее подходящих схем микрофизической параметризации Thompson-2008, позволяющей описать три типа твёрдых гидрометеоров и рекомендованной для расчётов на мелкой горизонтальной сетке (около 1 км), [23]. Параметризация микрофизических процессов Thompson-2008 основана на отдельном рассмотрении водяного пара и пяти видов гидрометеоров: дождевые и облачные капли – RAIN и CLOUD, частицы снега – SNOW, льда – ICE, и снежной крупы – GRAUPEL. Гидрометеоры

описаны распределением по размерам в приблизительных диапазонах: частицы льда – 0.001–1000 мкм, частицы снега – менее 10 мм, облачная влага (CLOUD) – менее 50 мкм, капли дождя – более 500 мкм. Высокая достоверность моделирования конвективных событий в Армении с помощью WRF и схемы Thompson-2008 показана в [26].

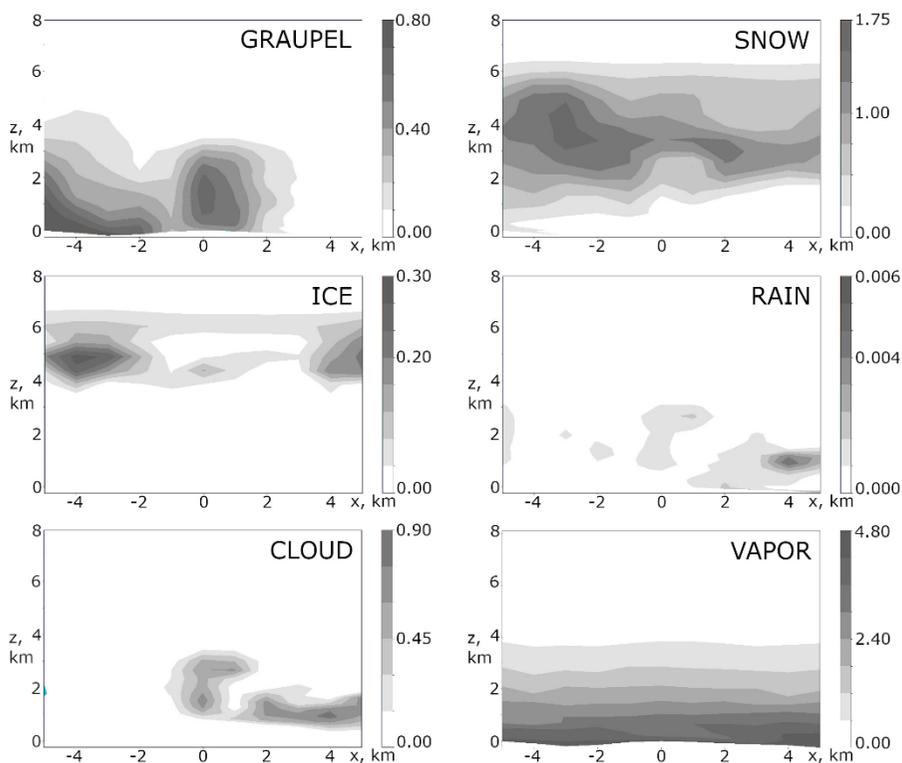
Для исследования влияния аэрозольных частиц на развитие конвективных явлений выполнено моделирование с применением микрофизической схемы NSSL и заданной однородной начальной концентрацией аэрозольных частиц в воздухе ( $10^7$ ,  $10^8$ ,  $10^9$ ,  $10^{10}$ ,  $10^{11}$  м<sup>3</sup>), а также с применением схемы Thompson Aerosol-Aware с учётом пространственного распределения аэрозольных частиц, найденного путём ассимиляции данных измерений. Показано, что учёт распределения аэрозольных частиц не является необходимым для моделирования создающих TGE облаков в регионе Арагац [A1].

**Глава 3** посвящена процессу и результатам оценки метеорологических и электрических свойств облаков, создающих TGE, наблюдавшихся на Станции Арагац [A1, A2, A4–A9].

**Раздел 3.1** содержит подробное описание результатов моделирования конвективного явления, сопровождавшего TGE, зарегистрированное на Станции Арагац 2016-06-11 [A1]. С помощью моделирования WRF описано распределение гидрометеоров. Во время основного возмущения приземного электрического поля (11:00–12:00 UT) над Станцией находились наиболее плотные скопления частиц снежной крупы и снега, выше – скопление частиц льда. В дальнейшем восстановление электрической структуры облака покажет, что именно заряд частиц снега и снежной крупы формирует измеренное на земной поверхности электрическое поле (малая плотность и большая высота расположения ледяных частиц делает влияние их заряда на приземное поле пренебрежимо малым). Найденная путём численного моделирования структура создавшего TGE облака представлена на Рис. 1.

В **Разделе 3.2** приведены результаты моделирования состояния атмосферы для менее интенсивного события TGE 2017-06-21 [A1]. Преобладающими типами гидрометеоров являются частицы снега и снежной крупы, как и для события 2016-06-11.

**Раздел 3.3** посвящён сравнению метеорологических свойств облаков, создающих TGE в летнем (с мая по октябрь) и зимнем сезонах [A2, A8]. Летний сезон характеризуется наиболее многочисленными и интенсивными событиями возмущения приземной напряжённости электрического поля и потока энергичных частиц. Относительно низкая плотность создающих TGE облаков обусловлена низкой влажностью воздуха в высокогорной местности Арагац. Низкая концентрация частиц льда связана с малым содержанием аэрозольных частиц, которые могли бы стать центрами кристаллизации для ледяных частиц. Характеристики событий, взятые из результатов наземных измерений и найденные путём моделирования WRF, приведены в табл. 1 и 2.



**Рис. 1.** Распределение водяных частиц (снежной крупы, снега, дождя, льда, мелких водных капель, пара) в облаке, создавшем TGE, 2016-06-11, 11:20 UT, в сечении вертикальной плоскостью, ориентированной с запада на восток (плотность в  $\text{г}/\text{м}^3$ ). Расположение Станции Арагац соответствует нулевым значениям обеих координат

*Таблица 1.* Плотность частиц снега и снежной крупы, по результатам моделирования состояния атмосферы для событий TGE летних сезонов 2016–2017

Дата события TGE	Увеличение потока гамма-излучения	Максимальная напряжённость электрического поля, кВ/м	Плотность скопления частиц, $\text{г}/\text{м}^3$		
			снег	снежная крупа	лёд
2016-05-04	1.26	20	0.3	1.5	0.07
2016-05-11	1.15	15	2.0	1.0	0.02
2016-06-11	1.25	30	1.2	1.5	0.08
2016-07-28	1.38	25	1.2	0.5	0.005
2017-08-17	1.10	20	3.0	0.2	0.001
2017-09-29	1.14	15	2.0	0.2	0.002
2017-10-01	1.23	20	2.0	0.7	0.001
2017-10-10	1.19	20	1.5	0.3	> 0.001

Таблица 2. Плотность частиц снега и снежной крупы, по результатам моделирования состояния атмосферы для событий TGE зимнего сезона 2019

Дата события TGE	Увеличение потока гамма-излучения	Максимальная напряжённость электрического поля, кВ/м	Плотность скопления частиц, г/м <sup>3</sup>		
			снег	снежная крупа	лёд
2019-01-07	1.15	5	0.06	< 0.001	< 0.001
2019-01-09	1.19	3	0.2	< 0.001	0.005
2019-01-17	1.10	8	0.6	< 0.001	0.002
2019-03-28	1.10	20	0.1	< 0.001	0.002

Для облаков, создающих TGE в летнем сезоне, характерна двухслойная структура с нижним кластером частиц снежной крупы и верхним кластером, сформированным частицами снега. Расстояние между кластерами по вертикали составляет около 1–2 км. Кластер ледяных частиц обычно находится над кластером снега и имеет примерно то же расположение по горизонтали. Массовая плотность скопления ледяных частиц на 2–4 порядка ниже массовой плотности кластера снега. Зимние облака содержат меньше снега, что связано с более низкой влажностью. Концентрация ледяных частиц в зимних облаках остаётся меньше концентрации частиц снега, отличаясь от неё не так сильно, как для летних событий. Для облаков, создающих интенсивные события TGE, характерна плотность скоплений частиц снега 0.3–2 г/м<sup>3</sup> и 0.01–1 г/см<sup>3</sup> для скоплений частиц снежной крупы.

**Раздел 3.4** описывает микрофизические закономерности накопления заряда на водных частицах. Основной процесс разделения заряда в исследуемых облаках – безындукционный перенос заряда между частицами снежной крупы и снега или льда при их соударениях. Величина и знак заряда, обретаемого частицей снежной крупы при одном взаимодействии, зависит от температуры и содержания жидкой влаги в облаке [27]. В случае, если метеорологические параметры внутри всего облака соответствуют одинаковому направлению переноса заряда между лёгкими и тяжёлыми гидрометеорами, то облако обретёт двухслойную электрическую структуру. В этом случае более тяжёлые гидрометеоры, движущиеся преимущественно вниз, будут иметь одинаковый знак электрического заряда (обыкновенно отрицательный), что приведёт к преимущественному накоплению заряда одного знака в нижней части облака, и противоположного – в верхней. Трёхслойная зарядовая структура формируется, когда в средней части облака меняется преимущественное направление переноса заряда между лёгкими и тяжёлыми гидрометеорами, тогда в одной части облака более крупные и тяжёлые частицы, преимущественно движущиеся вниз, заряжаются положительно, в другой – отрицательно, что и приводит к образованию трёхслойной структуры.

В ходе исследования условий разделения заряда в создающих TGE облаках результаты моделирования WRF сопоставлены с приведёнными в [27]

результатами лабораторных исследований. Показано, что условия разделения заряда в создающих TGE облаках могут быть подобны условиям, воспроизведённым в лабораторных исследованиях, и соответствуют одинаковому направлению перемещения заряда между частицами снежной крупы и снега в большей части облака. Вывод согласуется с описанной далее оценкой электрической структуры облака, согласно которой для создающих TGE облаков характерно двуслойное распределение заряда.

В **Разделе 3.5** представлена методика оценки распределения заряда в облаке, основанная на моделировании состояния атмосферы с помощью WRF и измерениях приземной напряжённости электрического поля [A1]:

1. Путём численного моделирования состояния атмосферы с помощью WRF определяется пространственное распределение водных частиц (льда, снега, снежной крупы, дождя, мелких капель и пара) с шагом 5 минут.

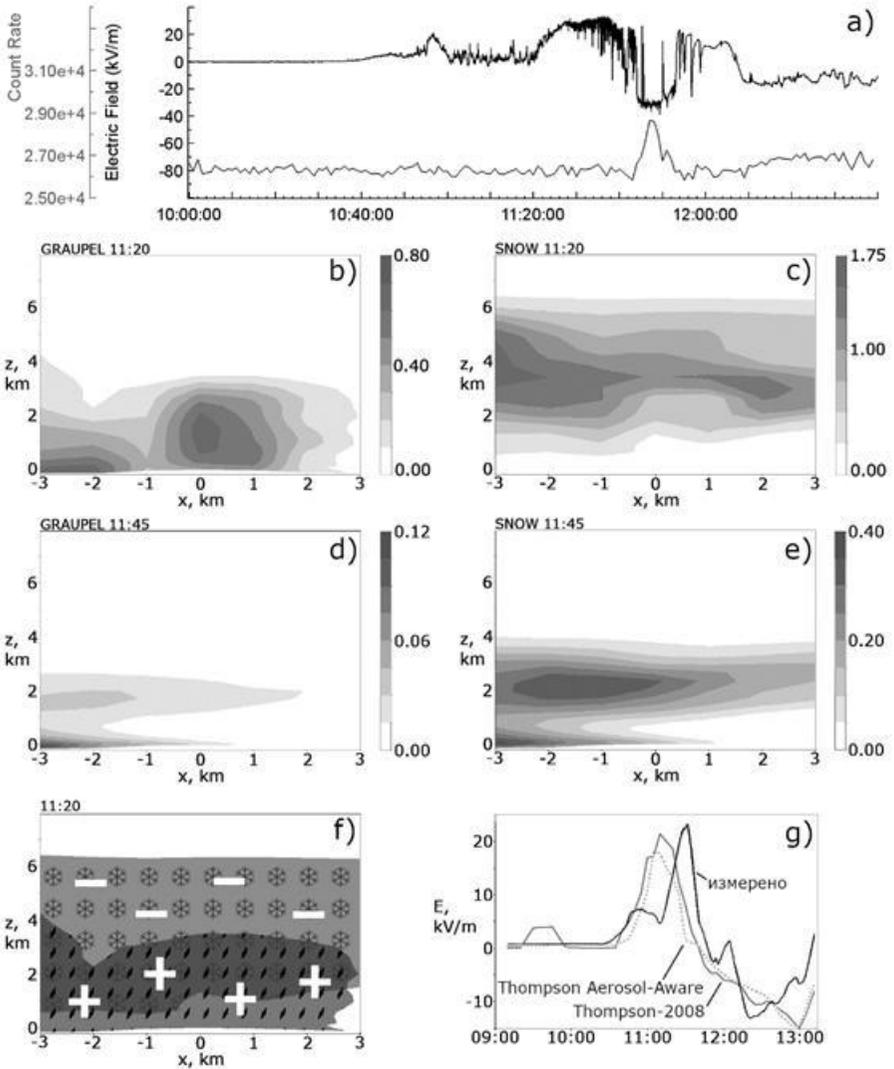
2. Пространственное распределение заряда для облачных частиц каждого типа считается совпадающим с пространственным распределением массы.

3. Динамика приземного электрического поля, которое может быть создано гидрометеорами каждого типа, рассчитывается по динамике плотности облачных частиц, с точностью до коэффициента пропорциональности зарядовой и массовой плотности скоплений каждого вида гидрометеоров.

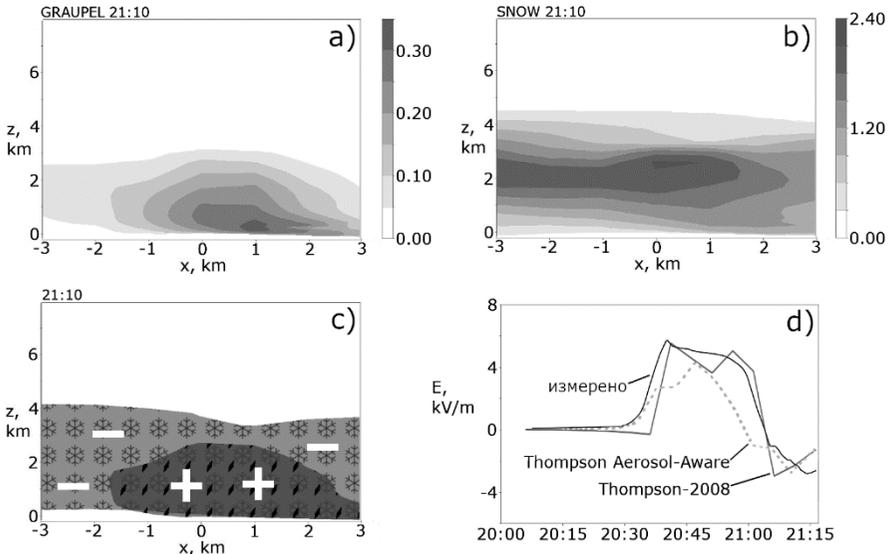
4. Набор коэффициентов, связывающих плотность заряда и массы гидрометеоров, определяются путём фиттинга измеренной динамики приземного электрического поля суммой напряжённостей полей, создаваемых гидрометеорами всех типов. Все временные зависимости электрических полей усреднены с окном по 25 минут для исключения влияния мелкомасштабных неоднородностей строения облака и ошибок моделирования и измерений. Фиттинг осуществляется методом линейной регрессии.

В **Разделе 3.6** действие методики продемонстрировано на примере исследования структуры облака, создавшего TGE 2016-06-11 [A1], Рис.2. Облако имело двуслойную электрическую структуру. Верхний слой состоит из частиц снега и имеет отрицательный заряд, нижний слой сформирован положительно-заряженными частицами снежной крупы. Объёмная плотность заряда равна примерно  $0.01 \text{ нКл/м}^3$  для снежной крупы и  $-0.02 \text{ нКл/м}^3$  для снега. Величина заряда в вертикальном столбе радиусом 1 км с центром основания в месте измерений в 11:20 UT: 0.1 Кл в нижнем слое и  $-0.2 \text{ Кл}$  в верхнем слое.

В **Разделе 3.7** приведены результаты восстановления структуры облака, создавшего TGE 2017-06-21 [A1]. Подобно событию 2016-06-11, TGE 2017-06-21 создано облаком с электрической структурой инвертированного диполя. Отличительной особенностью облака, находившегося над Станцией в 21:10 UT, является двуслойная структура скопления частиц снежной крупы, верхняя часть которого располагается примерно в той же области, что и скопление частиц снега.



**Рис. 2.** Характеристика события TGE 11 июня 2016 года: (a) измеренная динамика приземной напряжённости электрического поля и потока энергичных частиц; (b, c) и (d, e) распределение частиц снежной крупы и снега в вертикальной плоскости, проходящей через Станцию с запада на восток, в 11:20 UT и 11:45 UT соответственно (плотность в  $\text{г}/\text{м}^3$ ). (f) промоделированная электрическая структура облака в 11:20 UT (верхний отрицательно-заряженный кластер снежных частиц, и нижний положительно-заряженный кластер частиц снежной крупы), (g) приземная напряжённость электрического поля, усреднённая по 25 мин: измеренная и промоделированная с применением двух микрофизических схем



**Рис. 3.** Характеристика события TGE 21 июня 2017 года: (а, б) распределение частиц снежной крупы и снега в вертикальной плоскости, проходящей через Станцию с запада на восток, в 21:10 UT (плотность в  $\text{г}/\text{м}^3$ ). (с) промоделированная электрическая структура облака (верхний отрицательно-заряженный кластер снежных частиц, и нижний положительно-заряженный кластер частиц снежной крупы), (д) приземная напряжённость электрического поля, усреднённая по 25 мин: измеренная и промоделированная с применением двух микрофизических схем

*Таблица 3.* Параметры промоделированной электрической структуры облаков, создавших TGE, наблюдавшиеся на Станции Арагац в 2016–2017 годах, и относительное увеличение скорости счёта при событиях TGE, по данным с детектора Stand-3

Дата	Время	Плотность скопления гидрометеоров, $\text{г}/\text{м}^3$		Плотность заряда, $\text{нКл}/\text{м}^3$	
		снежная крупа	снег	+	-
2016-05-04	19:05	0.80	1.50	0.050	0.020
2016-05-12	13:45	0.15	1.30	0.030	0.060
2016-06-08	11:40	0.12	2.00	0.020	0.025
2016-06-11	11:20	0.60	0.40	0.012	0.020
2017-06-21	21:10	0.25	2.00	0.017	0.026
2017-08-17	18:55	0.18	1.20	0.002	0.001
2017-10-01	18:05	0.15	1.00	0.002	0.005
2017-10-10	14:05	0.08	1.20	0.001	0.003

**Раздел 3.8** характеризует электрическую структуру облаков для восьми исследованных событий TGE [A1, A2]. Для всех событий распределение заряда в облаке описывается структурой «обратного диполя», где нижний положительный заряд сформирован частицами снежной крупы, а верхний отрицательный заряд – частицами снега. Кластеры снежной крупы и снега обычно располагаются в 1–2 км один над другим. Параметры распределения заряда в протомоделированных облаках, создавших TGE, приведены в табл. 3.

**Раздел 3.9** посвящён обсуждению возможности оценки электрической структуры облака на основе данных о потоке мюонов, попытка чего была предпринята в [28]. Показано, что при нынешнем уровне развития измерительной техники не представляется возможным получение сколько-нибудь информативных сведений о распределении электрического поля в облаке по результатам измерения приземного потока мюонов [A5].

**Раздел 3.10** содержит краткий обзор сведений о структуре облаков, создающих TGF [A2]. Сведения о метеорологических свойствах облаков при TGF получены из изображений инфракрасного и оптического диапазона, полученных с геостационарных спутников (GOES-9, GOES-10, GOES-12, GMS, Meteosat-5, Meteosat-7, METEOSAT), а также по данным спутника The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) на низкой околоземной орбите (изображения микроволнового, оптического и инфракрасного диапазонов; трёхмерное распределение осадков, найденное в результате пассивного зондирования в микроволновом диапазоне).

Одно из ключевых отличий облаков, создающих TGE и TGF – их высота, оцениваемая как 2–10 км и 13–17 км соответственно, что может включать ошибку измерения: регистрация образующихся выше TGE и развивающихся ниже TGF затруднена более сильным поглощением излучения в воздухе. Возможность сравнения строения и структуры облаков, создающих TGE и TGF, ограничена в первую очередь количеством информации о плотности облаков при TGF, которая наиболее детально приведена в [29]. На основе доступной информации сделан вывод о том, что плотность скоплений твёрдых водных частиц в облаках, создающих TGE и TGF, имеет близкие значения. Концентрация мелких капель воды (облачной влаги) имеет, вероятно, более высокие значения в создающих TGF облаках, что обуславливает более высокую интенсивность процессов разделения заряда.

В **Главе 4** излагается разработанное аналитическое описание развития лавин релятивистских убегающих электронов [A6, A7]. Предложенная аналитическая модель представляет собой систему уравнений, характеризующих динамику количества частиц в составе лавин убегающих электронов. Частицы в рамках модели разделены на виды: убегающие электроны (с характерной энергией около 7 МэВ), медленные электроны (энергия от нескольких эВ до 10 кэВ), гамма-кванты, позитроны, положительные и отрицательные ионы.

**Раздел 4.1** содержит сведения о процессах взаимодействия частиц при развитии лавин релятивистских убегающих электронов, включая механизм релятивистской обратной связи. Таблица 4 описывает соотношение характерных значений частот процессов [8, 30, 31]:  $\nu_s$  – частота рождения медленных электронов,  $\nu_{at}$  – частота прилипания электронов к молекулам воздуха,  $\nu_{br}$  – частота создания тормозного излучения быстрыми электронами,  $\nu_{an}$  – частота аннигиляции позитрона и атомного электрона,  $\nu_c$  – суммарная частота, с которой фотон испытывает эффект Комптона или фотоэффект,  $\nu_{pp}$  – частота образования энергичным фотоном электрон-позитронных пар.

Таблица 4. Соотношение частот процессов в составе механизма лавин

	$\nu_s$	$\nu_{at}$	$\nu_{br}$	$\nu_{an}, \nu_c, \nu_{pp}$
$\nu, \text{c}^{-1}$	$10^{12}$	$10^8$	$10^6$	$10^5, 5 \cdot 10^4, 10^4$

В **Разделе 4.2** представлено аналитическое описание лавин релятивистских убегающих электронов, характеризующее динамику численности частиц в составе лавин. Показано, что уже в рамках простейшей модели может быть получено качественное представление о зависимости количества частиц от координаты: область, покинутая лавиной быстрых электронов, занята шлейфом из медленных электронов и положительных ионов [A6].

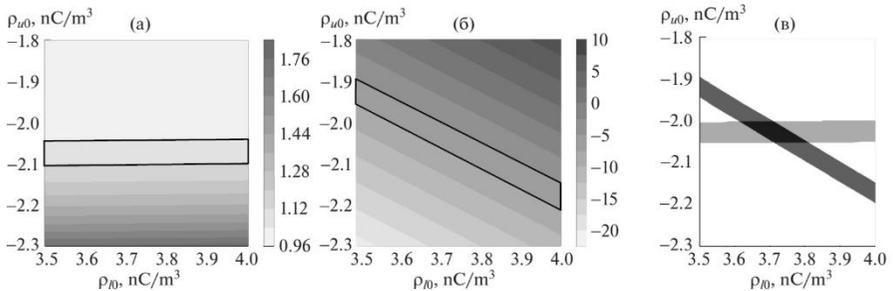
В **Разделе 4.3** предложено аналитическое описание развития лавин релятивистских электронов с учётом обратной связи [A6, A7]. Найдены решения, описывающие два модельных режима системы: квазистационарный однородный и режим самоподдержания лавин. Однородное квазистационарное решение составленной системы уравнений, соответствующее неизменной во времени концентрации частиц, может описывать поведение лавин в локализованных областях сильного поля. Режим самоподдержания лавин характеризуется постоянством численности частиц в лавинах при отсутствии внешнего источника, и может соответствовать длительным увеличениям потока энергичных частиц (TGE, gamma-glow). Значения частот основных процессов, перечисленных в Разделе 4.1, приводят к выводу, что вклады в вертикальную компоненту производной напряжённости поля от медленных и убегающих электронов соотносятся как  $10^4 : 1$  – преобладает вклад медленных электронов.

В **Разделе 4.4** приведена количественная оценка увеличения проводимости воздуха в области лавин, а также электрического тока, переносимого лавинами [A7]. Плотность медленных электронов сильно превосходит плотность быстрых электронов, поэтому изменение проводимости определяется именно количеством медленных электронов. Проводимости области лавин составляет примерно  $10^{-14}$  См/м, что сопоставимо со средней проводимостью в облаке при отсутствии лавин, в зависимости от влажности и других условий принимающей значения в диапазоне  $10^{-16} - 10^{-12}$  См/м. При латеральном разрыве лавины 1 км полный ток, переносимый одной лавиной, равен  $10^{-3}$  А.

**Раздел 4.5** посвящён оценке распределения заряда в облаке, создающем увеличение потока энергичных частиц, в рамках модели лавин убегающих электронов, с применением результатов наземных измерений потока энергичных частиц [А6, А9]. Развитие электронной лавины допускает аналитическое описание в рамках модели лавин убегающих электронов [32], математическое следствие которого позволяет связать относительное увеличение приземного значения потока гамма-излучения ( $I$ ) с длиной лавины ( $z_0$ ) и производной вертикальной компоненты напряжённости электрического поля по вертикальной координате в конце лавины ( $\frac{dE}{dz}$ ):

$$I = \exp \left[ \frac{z_0^2}{14.4 \text{ MV}} \frac{dE}{dz} \right]. \quad (1)$$

Распределение заряда описывается осесимметричной двуслойной структурой с геометрическими параметрами, определяемыми моделированием WRF. По распределению заряда рассчитывается профиль электрического поля, затем находятся приземная напряжённость электрического поля и относительное увеличение потока частиц (1). Сравнение рассчитанных значений с результатами измерений даёт оценку плотности зарядов двух слоёв, что показано на рис. 4 на примере TGE 2017-06-21 20:50 UT.



**Рис. 4.** (а, б) – Зависимость приземных значений относительного возрастания потока энергичных частиц и напряжённости электрического поля от плотностей заряда; (в) – области значений плотности зарядов, обеспечивающих соответствие измеренным значениям приземной напряжённости поля, увеличения потока энергичных частиц, и обем величинам сразу (пересечение полос). По горизонтальной оси – плотность заряда нижнего слоя, по вертикальной оси – плотность заряда верхнего слоя

Оцененные так значения плотности заряда систематически превышают значения, полученные по методике, описанной в главе 3. Оценка зарядовой структуры по первой методике обладает меньшей погрешностью по причине отсутствия предположений о механизме развития электронных лавин. Возможные причины отличия – предположения о связи распределения плотности массы и заряда, а также – влияние неоднородностей электрического поля на развитие лавин убегающих электронов.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показана возможность исследования свойств облаков, усиливающих потоки энергичных частиц, с помощью Weather Research and Forecasting Model. Определён набор параметров моделирования, обеспечивающий наиболее достоверное воспроизведение конвективных явлений, создающих нисходящие потоки энергичных частиц (TGE).

2. В результате исследования событий TGE, наблюдавшихся на Станции Арагац в 2011–2020 годах, с помощью моделирования WRF установлены характерные свойства создающих TGE облаков. Большинство событий TGE созданы облаками двуслойной структуры, где нижний слой на высоте 1–3 км образован частицами снежной крупы, а верхний слой образован частицами снега на высоте 4–7 км. Характерные значения плотности массы:  $0.01\text{--}1\text{ г/м}^3$  для скопления частиц снежной крупы и  $0.3\text{--}2\text{ г/м}^3$  для скопления частиц снега.

3. Изучена сезонная зависимость свойств создающих TGE облаков. Показано, что облака, создающие менее частые зимние события TGE, сформированы преимущественно частицами снега и льда. Более низкая по модулю напряжённость электрического поля, измеряемая вблизи поверхности земли при зимних событиях, связана с более низкой плотностью заряда в зимних облаках, относительно облаков при летних событиях TGE.

4. Разработана методика оценки электрической структуры создающего TGE облака. Найдено характерное распределение заряда для облаков, создающих интенсивные события TGE: дипольная структура с нижним положительным и верхним отрицательным слоями. Определено, что основными носителями заряда в регионе Арагац являются частицы снега и снежной крупы. Характерная плотность заряда на единицу объёма:  $0.001\text{--}1\text{ нКл/м}^3$ , на единицу массы:  $0.001\text{--}1\text{ нКл/г}$ .

5. Создана аналитическая модель развития лавин релятивистских убегающих электронов с учётом механизма обратной связи. На основе построенной модели добавочная проводимость воздуха, обусловленная развитием электронных лавин оценена как  $10^{-14}\text{ См/м}$ .

6. Предложен способ оценки свойств области развития лавин убегающих электронов на основе результатов измерений приземных значений электрического поля и потока энергичных частиц во время TGE, что позволяет уточнить свойства области существования электронных лавин, а также приводит к выводу о существенности неоднородности электрического поля для их развития.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dwyer J., Smith D., Cummer S.* High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 177. P. 133–196.
2. *Fishman G., Bhat P., Mallozzi R., Horack L., [et al.]*. Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin // *Science.* 1994. V. 264. P. 1313–1316.
3. *Chilingarian A.* Thunderstorm Ground Enhancements - model and relation to lightning flashes // *JASTP.* 2014. V. 107. P. 68–76.
4. *Stolzenburg M., Marshall T.* Charge Structure and Dynamics in Thunderstorms // *Planetary Atmospheric Electricity.* Springer New York, 2008. P. 355–372.
5. *Gurevich A.* On the theory of runaway electrons // *Zhur. Eksptl'. i Teoret. Fiz.* 1960. V. 39.
6. *Dwyer J.* A fundamental limit on electric field in air // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 30, No 20. P. 2055.
7. *Rakov V. A., Uman M. A.* Lightning Physics and Effects. Cambridge Univ. Press, 2003.
8. *Dwyer J.* The relativistic feedback discharge model of terrestrial gamma ray flashes // *Journal of Geophysical Research (Space Physics).* 2012. Feb. V. 117. P. 2308.
9. *Chilingarian A.* Thunderstorm Ground Enhancements - model and relation to lightning flashes // *JASTP.* 2014. V. 107. P. 68–76.
10. *Bartoli B., Bernardini P., Bi X.-H., Cao Z., [et al.]*. Observation of the thunderstorm-related ground cosmic ray flux variations by ARGO-YBJ // *Physical Review D.* 2018. V. 97.
11. *Tsuchiya H., Hibino K., Kawata K., Hotta N., [et al.]*. Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet // *Physical Review D.* 2012. V. 85.
12. *Gurevich A., Almenova A., Antonova V., Chubenko A., [et al.]*. Observations of high-energy radiation during thunderstorms at Tien-Shan // *Physical Review D.* 2016. V. 94.
13. *Reuveni Y., Yair Y. Price C., Steinitz G.* Ground level gamma-ray and electric field enhancements during disturbed weather: Combined signatures from convective clouds, lightning and rain // *Atmospheric Research.* 2017. V. 196. P. 142–150.
14. *Chum J., Langer R., Baše J., Kollárik M., Strhárský I., Diendorfer G., Rusz J.* Significant enhancements of secondary cosmic rays and electric field at the high mountain peak of Lomnický Štít in High Tatras during thunderstorms // *Earth, Planets and Space.* 2020. V. 72.
15. *Chilingarian A., Daryan A., Arakelyan K., Hovhannisyan A., [et al.]*. Groundbased observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons // *Phys. Rev. D.* 2010. V. 86. P. 072003.

16. *Chilingarian A., Hovsepyan G., Hovhannisyan A.* Particle bursts from thunderclouds: Natural particle accelerators above our heads // *Phys. Rev. D.* V. 83. P. 062001.
17. Advanced Data Extraction Infrastructure of Aragats Space Environmental Center. <http://crd.yerphi.am/adei>.
18. *Chilingarian A., Mkrtychyan H., Karapetyan G., Chilingaryan S., Sargsyan B., Arestakesyan A.* Catalog of 2017 Thunderstorm Ground Enhancement (TGE) events observed on Aragats // *Sci.Reports.* 2019. V. 9, No 6253.
19. *Pruppacher H., Klett J.* Microphysics of Clouds and Precipitation, Second revised and expanded edition with an introduction to cloud chemistry and cloud electricity. Springer Netherlands, 2010.
20. *Takahashi T.* Electric charge of small particles (1-40  $\mu\text{m}$ ) // *J. Atm. Sci.* 1972. V. 29. P. 921–928.
21. *Bauer P., Thorpe A., Brunet G.* The quiet reVution of numerical weather prediction // *Nature.* 2015. Sept. V. 525. P. 47–55.
22. WRF model. [www.mmm.ucar.edu/weather-research-andforecasting-model](http://www.mmm.ucar.edu/weather-research-andforecasting-model)
23. WRF Model: User’s manual. [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_v4/contents.html](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/contents.html)
24. *Thompson G., Field P., Rasmussen R., Hall W.* Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization // *Mon. Wea. Rev.* 2008. V. 136. P. 5095–5115.
25. *Thompson G., Eidhammer T.* A Study of Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation Development in a Large Winter Cyclone // *Journal of the Atmospheric Sciences.* 2014. V. 71. P. 3636.
26. *Gevorgyan A.* Convection-permitting simulation of a heavy rainfall event in Armenia using the WRF model // *J. Geophys. Res.* 2018. V. 123, No 19. P. 11008–11029.
27. *Saunders C.* Charge Separation Mechanisms in Clouds // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. P. 335–353.
28. *Hariharan B., Chandra A., Dugad S., Gupta S., [et al.].* Measurement of the Electrical Properties of a Thundercloud Through Muon Imaging by the GRAPES-3 Experiment // *Physical Review Letters.* 2019. V. 122.
29. *Barnes D., Splitt M., Dwyer J., Lazarus S., Smith D., Rassoul H.* A study of thunderstorm microphysical properties and lightning flash counts associated with terrestrial gamma-ray flashes: TGF thunderstorm microphysical relations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2015. V. 120. P. 3453–3464.
30. *Dwyer J., Babich L.* Low-energy electron production by relativistic run-away electron avalanches in air // *Journal of Geophysical Research.* 2011. V. 116.
31. *Berestetskii V., Lifshitz E., Pitaevskii L.* Quantum electrodynamics. V. 4. Oxford : Pergamon Press, 1982.
32. *Dwyer J., Cummer S.* Radio emissions from terrestrial gamma-ray flashes // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2013. V. 118. P. 3769–3790.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. *Svechnikova E., Ilin N., Mareev E.* Characteristic Features of the Clouds Producing Thunderstorm Ground Enhancements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. V. 126, No 9.

A2. *Свечникова Е.К., Ильин Н., Мареев Е.* Метеохарактеристика энергичных атмосферных явлений // *Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2020. Окт. т. 17, 6(231). С. 791–802.

A3. *Мареев Е., Стасенко В., Шаталина М., Дементьева С., Евтушенко А., Свечникова Е., Слюняев Н.* Российские исследования атмосферного электричества в 2015–2018 гг. // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 6. С. 79–93.

A4. *Chilingarian A., Hovsepyan G., Svechnikova E., Zazyan M.*, Electrical structure of the thundercloud and operation of the electron accelerator inside it // *Astroparticle Physics*. 2021. P. 102615.

A5. *Chilingarian A., Hovsepyan G., Svechnikova E., Mareev E.* Comment on “Measurement of the Electrical Properties of a Thundercloud through Muon Imaging by the GRAPES-3 Experiment” // *Physical Review Letters*. 2020. V. 124. P. 019501-1.

A6. *Свечникова Е., Ильин Н., Мареев Е.* Оценка распределения электрического заряда в облаке по данным о вариации потока энергичных частиц под облаком // *Доклады российской академии наук. Науки о Земле*. 2021. Т. 496, № 2. С. 198–203.

A7. *Svechnikova E., Mareev E.* Ionisation of air by electron avalanches in a cloud // *Proceedings of 2020 XXXIII-rd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*.

A8. *Свечникова Е., Ильин Н., Мареев Е.* Сезонная изменчивость облаков, создающих потоки энергичных частиц // *Материалы XIV Международной Школы молодых учёных “Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника*. 2020. С. 87–89.

A9. *Свечникова Е., Мареев Е., Ильин Н.* Исследование структуры облаков, создающих потоки энергичных частиц // *Труды Международной научно-практической конференции “Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ”*. 2020. С. 241–243.

СВЕЧНИКОВА Екатерина Константиновна

**ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ СОБЫТИЯ В АТМОСФЕРЕ  
И ИХ СВЯЗЬ  
С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ОБЛАКА**

Автореферат

Подписано в печать 02.07.2021 г.

Формат  $60 \times 90 \frac{1}{16}$ . Бумага офсетная №1.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 23(2021).

Отпечатано в типографии ФИЦ Институт прикладной физики РАН,  
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46