

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

«Высокоэнергичные события в атмосфере и их связь с электрической структурой облака»

Аспирант: Свечникова Екатерина Константиновна

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Мареев Евгений Анатольевич,
д.ф-м.н., чл.-кор. РАН

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород
2020

1 Общая характеристика работы

1.1 Актуальность темы

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 этого явления 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 GBM (Gamma-Ray Burst Monitor)), созданным для регистрации гамма-излучения космических источников.

Явление увеличения приземного потока энергичных фотонов и электронов под грозовыми облаками (thunderstorm ground enhancement, TGE) впервые было обнаружено и активно изучается с помощью оборудования Исследовательской Станции Арагац в виде потоков электронов и фотонов с энергиями 3 МэВ–100 МэВ, с характерной длительностью около 100 мс [3]. Станция Арагац является основным местом наблюдения TGE, обеспечивая подавляющее большинство данных измерений параметров TGE.

TGE и TGF возникают в результате развития потоков энергичных частиц в электрическом поле грозового облака. Как правило, электрическая структура облака описывается 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 метеохарактеристик TGF и TGE создает общую картину связи параметров грозовых систем с вероятностью возникновения высокоэнергичных явлений.

Гамма-вспышки земного происхождения, обнаруженные в начале 1990-ых годов, вызвали значительный рост интереса к изучению генерации потоков энергичных частиц

грозовыми облаками. В последние десятилетия проведены многочисленные спутниковые и наземные экспериментальные кампании, при этом, до сих пор отсутствует единая точка зрения на механизмы, вызывающие подобные явления.

1.2 Цели и задачи

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

- Определение строения и метеорологических свойств облаков, создающих нисходящее гамма-излучение.
- Определение электрической структуры облаков, создающих TGE.
- Разработка аналитического описания развития потоков энергичных частиц в электрифицированных облаках в рамках модели лавин релятивистских убегающих электронов.
- Разработка аналитического описания развития потоков энергичных частиц в электрифицированных облаках в рамках модели разряда с релятивистской обратной связью.

1.3 Научная и практическая значимость

Вопрос о механизме происхождения энергичного излучения грозовых облаков тесно переплетён с вопросом об инициации молниевых разрядов. Выяснение закономерностей развития гамма-излучения облаков позволяет приблизить понимание фундаментальных процессов, протекающих в электрифицированных облаках, а также обеспечивает новые возможности прогноза, в том числе — прогноза событий энергичного излучения. Отдельный аспект применения результатов — оценка влияния порождаемых облаками энергичных частиц на наземные объекты, а также на оборудование и экипаж самолётов.

1.4 Научная новизна

В рамках настоящей работы впервые удалось сделать следующее:

1. Осуществлено численное моделирование (с помощью WRF-model) конвективных явлений, при которых наблюдаются нисходящие потоки гамма-излучения. Для этого определены параметры моделирования, позволяющие наиболее достоверно описывать облака, создающие TGE.
2. Найдены характерные метеорологические свойства облаков, создающих нисходящее гамма-излучение (явление TGE), наблюдаемое на Научной Станции Арагац.

3. Разработана методика оценки электрической структуры облаков, создающих TGE, по результатам приземных измерений электрического поля и с помощью моделирования состояния атмосферы.
4. Определены характерные свойства электрической структуры создающих TGE облаков.
5. Создано аналитическое описание развития потоков энергичных частиц в электрифицированных облаках в рамках модели лавин релятивистских убегающих электронов.
6. Создано аналитическое описание развития потоков энергичных частиц в электрифицированных облаках в рамках модели разряда с релятивистской обратной связью.
7. В рамках модели разряда с релятивистской обратной связью предложена методика оценки распределения заряда в облаке, создающем TGE.

В рамках выполнения пунктов 1–4 найдены свойства облаков, создающих TGE в Арагац. Полученные сведения сопоставлены с результатами исследований ближайших аналогов явления (TGF и нисходящие потоки энергичных частиц (TGE), наблюдаемые в других географических областях). Сравнение позволило получить дополнительную информации о специфике изучаемого феномена. Аналитическое описание, разработанное и применённое в пунктах 5–6, выгодно отличается от других моделей простотой и наглядным видом вклада всех учтённых физических механизмов в описываемый процесс и существенно расширяет возможности исследования квазистационарного режима потока энергичных частиц. Аналитическая модель допускает подстройку под конкретные физические условия, и поэтому в перспективе может применяться для моделирования процесса развития потоков энергичных частиц в облаках с учётом локальной специфики климатических и метеорологических условий. Предложенная в пункте 7 методика является первым применением модели разряда с релятивистской обратной связью для оценки электрической структуры облака, создающего TGE.

1.5 Апробация результатов

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [5, 6, 7, 8], а также были представлены на конференциях: на Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле EGU-2020 (Online, 2020), на 27й Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики IUGG-2019 (Монреаль, Канада, 2019), на международном симпозиуме “Thunderstorm and Energetic Particles Acceleration” (TEPA) (Бюракан, Армения, 2018, 2019), на международной конференции по атмосферному электричеству “ICAE-2018” (Нара, Япония, 2018), 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.

1.6 Личный вклад автора в проведенные исследования

Все результаты, изложенные в научно-квалификационной работе и вошедшие в [5, 6, 7, 8], получены при непосредственном участии автора. В работах [5, 7] вклад автора был определяющим, в работах [6, 8] автору принадлежат разделы, связанные с описанием лавин убегающих электронов в облаках, а также посвящённые моделированию электрической структуры облака.

2 Краткое содержание Научно-квалификационной работы

Глава 1 (Введение) содержит обоснование актуальности темы настоящего исследования, формулировку целей работы, объяснение теоретической и практической значимости полученных результатов, а также краткий обзор состояния сферы исследования.

В **Главе 2** рассмотрены наиболее широкоизвестные модели образования гамма-излучения электрифицированными облаками. Для каждой модели указан уровень успешности описания результатов наблюдений потоков гамма-излучения, а также характерные значения параметров электрической структуры облака, необходимых для реализации механизма (минимальная напряжённость электрического поля и протяжённость области пространства, где напряжённость поля превышает это значение). Подчёркнута связь между вопросом о происхождении гамма-излучения электрифицированных облаков и проблемой инициации молниевых разрядов.

Раздел 2.1 описывает явление убегания электронов, на чём основаны все обсуждаемые модели возникновения гамма-излучения. Убегающими называются электроны, движущиеся в воздухе при наличии электрического поля, для которых увеличение энергии под влиянием электрического поля превышает потери энергии при взаимодействии с воздухом. Для убегания необходимо электрическое поле напряжённости $2.8 \cdot 10^5 \text{ В/м} \times n$ (где n — плотность воздуха относительно её значения на уровне моря при нормальных условиях) [9], что близко к максимальному значению напряжённости электрического поля, измеренному в облаке [10], благодаря чему концепция пробоя на убегающих электронах обрела известность.

Раздел 2.2 посвящён обсуждению модели лавин релятивистских убегающих электронов (relativistic runaway electron avalanche, RREA), основанной на идее о создании каждым убегающим электроном новых энергичных электронов. Высокоэнергичные (убегающие) электроны ионизируют воздух, производя вторичные электроны, некоторые

из которых обладают достаточной для убегания энергией. Такие вторичные электроны будут ускоряться, порождать новые убегающие электроны, и так далее. Поэтому количество быстрых электронов в достаточно больших полях будет экспоненциально возрастать со временем и пройденным ими расстоянием. Упомянется модель, описывающая генерацию потоков гамма-излучения молниевым разрядом, называемая моделью молниевых лидеров. Согласно современным представлениям, инициирование гамма-излучения молниевым разрядом наиболее вероятно происходит также посредством образования лавин релятивистских убегающих электронов. Таким образом, большинство исследований свидетельствует в пользу важности механизма электронных лавин для создания гамма-излучения электрифицированных облаков.

Раздел 2.3 содержит описание модели разряда с релятивистской обратной связью (relativistic feedback discharge model, RFD-model), учитывающей возможность резкого увеличения количества лавин в результате процессов с участием позитронов и энергичных квантов, которые образуются при развитии исходной лавины. Эти частицы способны распространяться к началу области, пригодной для существования лавин, и там производить новые высокоэнергичные электроны. Механизм обратной связи сильно увеличивает количество энергичных электронов на выходе из области большой напряжённости поля (в конце лавины). В электрическом поле достаточно большой напряжённости разряд становится самоподдерживающимся: внешний источник энергичных частиц (космические лучи) может быть убран, что не приведёт к существенному изменению итогового потока частиц на выходе лавины. Механизм разряда с обратной связью реализуется при меньших значениях напряжённости и предотвращает усиление поля до величины, необходимой для действия модели разряда под влиянием широкого атмосферного ливня.

Глава 3 посвящена разновидности явления гамма-излучения облаков, наблюдаемому на земной поверхности, под облаками. Увеличение приземного потока энергичных фотонов и электронов под грозовыми облаками (thunderstorm ground enhancement, TGE) наблюдается для электронов и фотонов с энергиями 3 МэВ–100 МэВ, с характерной длительностью около 100 мкс [3], при прохождении электрифицированных облаков над местом наблюдения.

В **Разделе 3.1** приводятся характеристики оборудования Исследовательской Станции Арагац, обеспечивающей основную часть данных о TGE, наблюдаемых в мире. Все данные о приземном значении электрического поля и потока энергичных частиц, использованные в данном исследовании, взяты из открытого архива результатов измерений на Исследовательской Станции Арагац [11]. Уникальными свойствами Станции Арагац являются её высокогорное расположение (3200 м над у.м.) и наличие обширного комплекса измерительных приборов, включая детекторы энергичных частиц, успешно применяющегося для исследования космических лучей и их преобразования облаками земной атмосферы.

Отдельное внимание уделено детекторам гамма-излучения — на основе кристаллов

NaI(Tl), а также детектора Stand-3 на основе пластикового сцинтиллятора. Использование детекторов различных типов необходимо для определения состава и энергетических свойств потока энергичных частиц, попадающего на детекторы. Приведены результаты численного моделирования процесса взаимодействия энергичных частиц с детектором на основе NaI(Tl), необходимые для определения состава 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.

В **Разделе 3.2** перечислены основные свойства явления TGE. Приведены сведения и рассуждения, необходимые для анализа электрической структуры создающих TGE облаков, представленного в следующих главах. За 2016-2017 годы на Станции Арагац наблюдалось более двух сотен событий TGE. Наиболее часто TGE наблюдаются с мая по июнь. Температура воздуха в месте наблюдения при регистрации TGE обычно находится в пределах от -5°C до 5°C , события с наиболее сильным превышением потока гамма-излучения над фоновым значением наблюдаются при температуре от -3°C до 3°C . Превышение потоком электронов и фотонов фонового значения для большинства событий находится в пределах 10%, в редкий случаях приближаясь к 100%. Динамика электрического поля, регистрируемая стационарным инструментом при движении облака над местом наблюдения, может рассматриваться в качестве зависимости электрического поля от горизонтальной координаты, так как на временном масштабе прохождения облака над местом наблюдения (несколько десятков минут) зарядовая структура приблизительно постоянна [12, 13]. Типичное значение приземной горизонтальной скорости ветра составляет 3–8 м/с, то есть за 20 минут облако перемещается на 1–2 км по горизонтали.

Глава 4 посвящена численному моделированию состояния атмосферы при TGE. Обсуждена необходимость применения численного моделирования для исследования структуры создающих TGE облаков. Описаны доступные и возможные источники сведений для верификации результатов моделирования — результаты измерения радиолокационной отражаемости, результаты наземных измерений, спутниковые наблюдения в оптическом и ИК-диапазонах. Указаны области применимости, а также преимущества и недостатки каждого способа верификации.

В **Разделе 4.1** перечислены виды численных моделей, применяемых для прогноза атмосферных явлений. Обсуждается проблема определения и оценки корректности моделирования. Приводится характеристика современного уровня развития методов численного моделирования состояния атмосферы.

Раздел 4.2 содержит описание свойств модели The Weather Research and Forecasting model (WRF-ARW, v. 4.1.2) [14], применённой в настоящем исследовании. Модель WRF — система численного моделирования атмосферных явлений и прогноза погоды, основанная на решении негидростатических уравнений Эйлера для сжимаемой жидкости. Модель WRF широко применяется для исследовательских и прогностических прило-

жений благодаря открытому доступу и централизованной поддержке. Численное моделирование состояния атмосферы с помощью WRF позволяет определить метеорологические свойства конвективных явлений, создающих высокоэнергичные явления — TGE и TGF. Метеорологические свойства облаков (распределение температуры, давления, скорости ветра; плотность и гидрометеорный состав) являются результатом моделирования с помощью WRF. Для определения электрической структуры облака на основе результатов моделирования WRF разработана оригинальная методика, описанная в Главе 6 данной работы.

Раздел 4.3 повествует о применении модели WRF для исследования облачности над Станцией Арагац. Для моделирования состояния атмосферы с помощью модели WRF в рамках данного исследования применена стратегия двух вложенных областей, с центром в месте расположения одного из наблюдательных пунктов (40.4715, 44.1815). Внешний домен с размерами 2700 x 1800 км с шагом 3 км, полностью охватывает Черное и Каспийское моря, Кавказские и горы, Малоазиатское, Армянское и Иранское нагорья. Внутренний домен с размерами 90 x 90 км с шагом 1 км детально воспроизводит гору Арагац и её ближайшую окрестность.

Подчёркнута важность выбора микрофизической параметризации для корректного моделирования конвективного явления с помощью модели WRF. Основными критериями выбора параметризации являются возможность описания минимум трёх типов твёрдых гидрометеоров (так как твёрдые гидрометеоры являются основными носителями заряда в облаке [15]) и шаг по горизонтальной координате, не превышающий 1 км. Указанные требования обуславливают выбор микрофизической параметризации Томпсона [16], позволяющей описать три типа твёрдых гидрометеоров и рекомендованной для расчётов на мелкой горизонтальной сетке (с шагом около 1 км, [17]). Параметризация являет собой совокупность соотношений, определяющих темп возникновения и исчезновения частиц каждого типа. Применённая параметризация микрофизических процессов основана на отдельном рассмотрении водяного пара и 5 видов гидрометеоров (дождевые и облачные капли — RAIN и CLOUD, частицы снега — SNOW, льда — ICE, и ледяной крупы — GRAUPEL) [16].

Обсуждено влияние начальных условий на результат моделирования. На примере события TGE, наблюдавшегося на Станции Арагац 2018-05-30, исследовано влияние выбора момента инициализации модели и состояния атмосферы в первые часы моделируемого интервала на корректность воспроизведения характеристик атмосферы. В качестве показателя точности моделирования использовано сравнение измеренной и промоделированной динамики значений температуры (на высоте 2 м над земной поверхностью) и давления (на высоте 10 м над земной поверхностью). Показано, что для обеспечения достоверности моделирования необходимо, чтобы конвективное событие отстояло на 6–8 ч от момента инициализации модели, а также отсутствие облачности в малом домене в первые 6–8 ч моделируемого интервала (показателем отсутствия облачности служит невозмущённое значение приземного электрического поля, согласно

результатам измерений на Станции Арагац).

Исследовано влияние концентрации аэрозолей на успешность моделирования конвективных явлений, наблюдаемых на Станции Арагац. С применением двухмоментной микрофизической параметризации NSSL, учитывающей процессы с участием аэрозолей (cloud condensation nuclei, ccn), проведено моделирование для пяти различных значений концентрации аэрозолей: $1.0e07$, $1.0e08$, $1.0e09$, $1.0e10$, $1.0e11$ m^{-3} . Рассмотренный диапазон концентрации аэрозолей так широк, что заведомо содержит значение, характеризующее условия над Станцией Арагац, о котором нет более подробных сведений. Результаты моделирования сопоставлены с результатами, полученными с использованием микрофизической параметризации Томпсона, не учитывающей процессы с участием аэрозолей, а также с результатами измерения радиолокационной отражаемости (радар находится примерно в 20 км от Станции Арагац). Показано, что распределение радиолокационной отражаемости, найденное без учёта влияния аэрозолей, наиболее сходно с распределением, полученным для концентрации аэрозолей $1.0e10$ m^{-3} (что есть обеспечивающее максимальную радиолокационную отражаемость в исследованном диапазоне концентрации аэрозолей).

Глава 5 посвящена результатам оценки метеорологических и электрических свойств облаков, создающих TGE, наблюдавшиеся на Станции Арагац.

Раздел 5.1 содержит результаты моделирования состояния атмосферы для события TGE 2016-06-11, характеризующего динамикой приземной напряжённости электрического поля и потока гамма-излучения, представленной на Рис. 1.

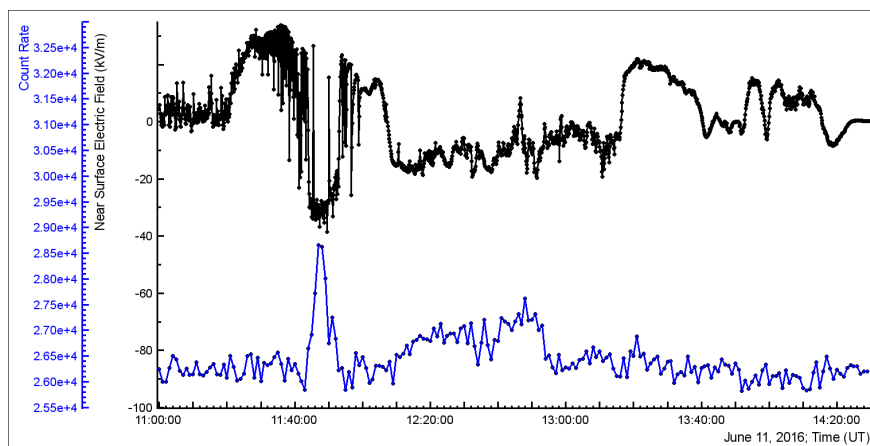


Рис. 1: Динамика приземного электрического поля (чёрная кривая, по данным МАКЕТ, измерения с шагом 1 с) и потока гамма-излучения (синяя кривая, по данным с детектора Stand-3, шаг 1 мин) для события TGE 2016-06-11. Положительной выбрана вертикальная проекция электрического поля, направленного вниз. Результаты измерений взяты из открытого архива [11].

Промоделировано распределение водных частиц (гидрометеоров) в составе обусловившего TGE облака. Рис. 2 демонстрирует промоделированную зависимость концентрации водных частиц шести типов от высоты над местом наблюдения времени в рамках события возмущения приземных значений напряжённости электрического поля и

потока энергичных частиц, 09:00–14:00 UT, 2016-06-11. Можно видеть, что во время основного возмущения приземного электрического поля (11:00–12:00 UT) (Рис. 1) над Станцией находились наиболее плотные скопления частиц снежной крупы и снега, а также, на бóльших высотах — 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).

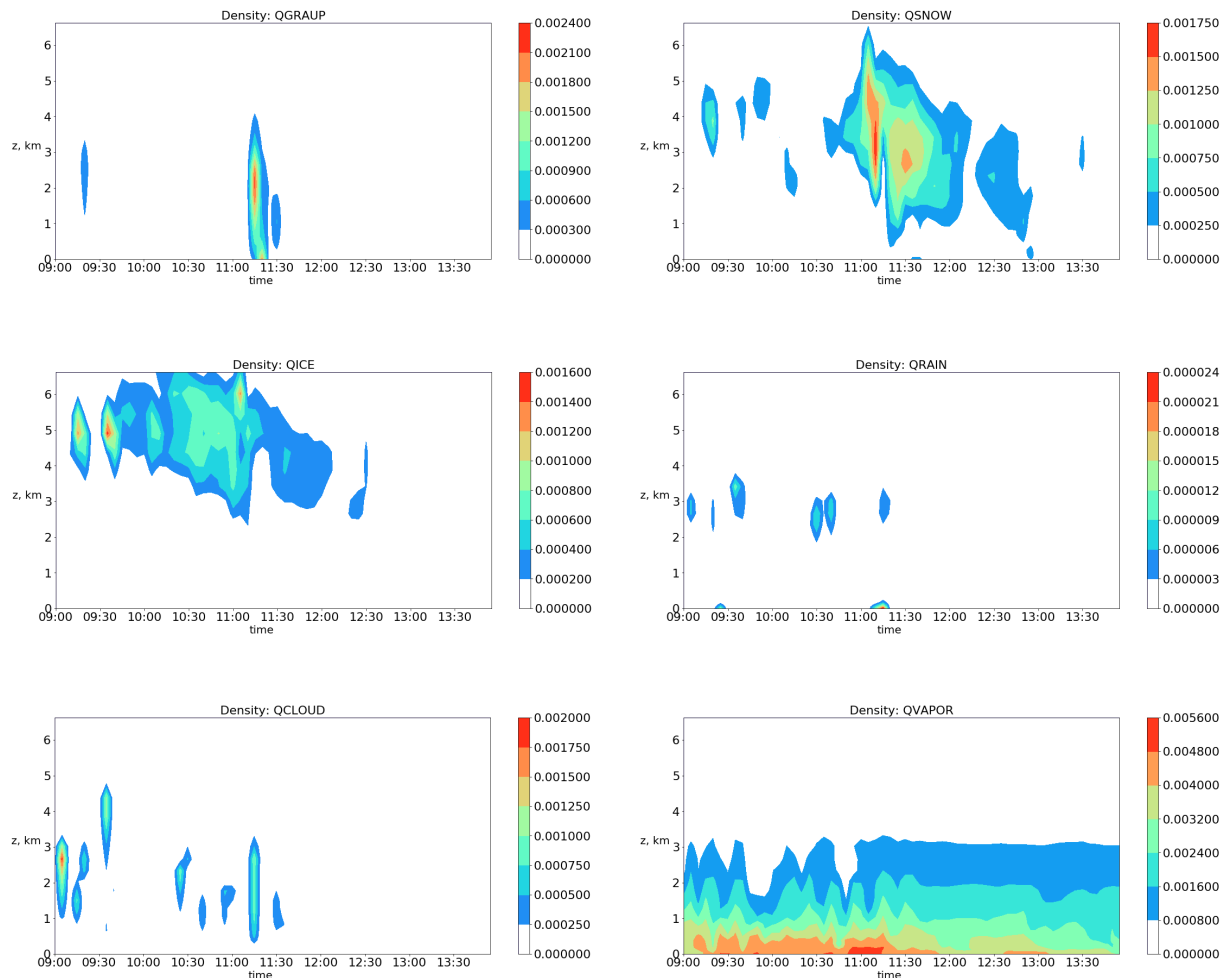


Рис. 2: Динамика распределения водяных частиц (снежной крупы, снега, дождя, льда, мелких водных капель, пара) над Станцией, 09:00–14:00 UT, 2016-06-11. Расположение Станции Арагац соответствует нулевым значениям обоих координат. Цветовая шкала отображает значения массовой плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Найденная путём численного моделирования структура облака, обусловившего явление TGE, представлена на Рис. 3. Показано, что распределение концентрации частиц облачной влаги и вертикальной компоненты скорости ветра в вертикальной плоскости, проходящей через место наблюдения, имеют максимумы примерно в одних и тех же областях. То есть, наиболее плотные скопления облачной влаги (частицы которой имеют

размер в основном менее 500 мкм) образуются в частях облака с наиболее интенсивными восходящими потоками воздуха.

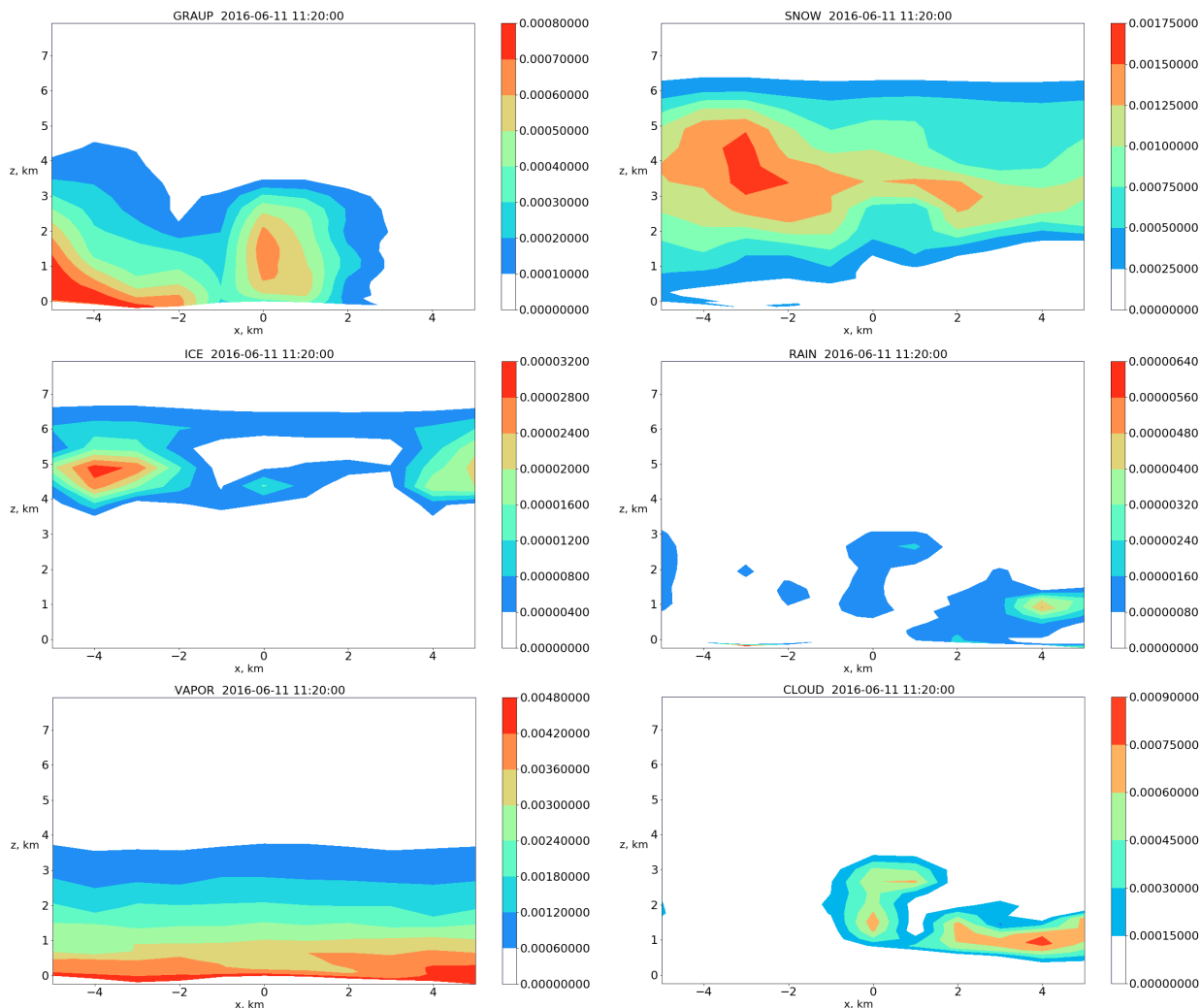


Рис. 3: Распределение водяных частиц (снежной крупы, снега, дождя, льда, мелких водных капель, пара) в облаке, создавшем TGE, 2016-06-11, 11:20 UT, в сечении вертикальной плоскостью, ориентированной с запада на восток. Расположение Станции Арагац соответствует нулевым значениям обоих координат. Цветовая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

В **Разделе 5.2** приведены результаты моделирования состояния атмосферы для менее интенсивного события TGE 2017-06-21. Преобладающими типами гидromетеоров являются частицы снега и снежной крупы, как и для события 2016-06-11.

Раздел 5.3 посвящён сравнению метеорологических свойств облаков, создающих TGE в летнем (с мая по октябрь) и зимнем сезонах. Характеристики событий, полученные при наземных измерениях и найденные путём моделирования WRF, приведены в Табл. 1, 2.

Дата события TGE	Относительное увеличение потока гамма-излучения	Максимальное эл.поле, кВ/м	Плотность скопления частиц снега, мг/м ³	Плотность скопления частиц снеж.крупы, мг/м ³	Плотность скопления частиц льда, мг/м ³
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	менее 0.001

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

Дата события TGE	Относительное увеличение потока гамма-излучения	Максимальное эл.поле, кВ/м	Плотность скопления частиц снега, мг/м ³	Плотность скопления частиц снеж.крупы, мг/м ³	Плотность скопления частиц льда, мг/м ³
2019-01-07	1.15	5	0.06	менее 0.001	менее 0.001
2019-01-09	1.19	3	0.2	менее 0.001	0.005
2019-01-17	1.10	8	0.6	менее 0.001	0.002
2019-03-28	1.10	20	0.1	менее 0.001	0.002

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

Для облаков, создающих TGE, 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 в 1–2 км 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 остаётся меньше концентрации частиц снега, отличаясь от неё не так сильно, как для летних событий.

Характерные значения плотности массы: 400–2000 г/см³ для скопления частиц снега и 100÷800 г/см³ для скопления частиц снежной крупы.

Раздел 5.4 описывает микрофизические закономерности накопления заряда на водных частицах. Приведены сведения о зависимости заряда гидрометеоров от типа и размера, взятые из балонных измерений [4, 12, 18, 19], а также из лабораторных исследований, описывающих искусственно созданные скопления водных частиц [20, 21, 22, 23, 15]. Обсуждена диаграмма знака перемещения заряда в осях “температура — концентрация облачной влаги”, построенная на основе результатов лабораторных исследований [24, 25, 22, 26], и её возможная применимость к процессам, сопровождающим конвективные явления в окрестностях Станции Арагац.

В **Разделе 5.5** представлена разработанная в ходе настоящего исследования методика оценки распределения заряда в облаке, основанная на моделировании состояния атмосферы с помощью WRF и использовании результатов измерения приземной напряжённости электрического поля. Применимость методики основана на следующих

предположениях, находящихся в согласии с результатами балонных измерений и лабораторных исследований процессов электризации. Приземное электрическое поле считается созданным только зарядами, расположенными на водных частицах в составе облака (гидрометеорах). Для каждого типа гидрометеоров объёмная плотность заряда считается пропорциональной объёмной плотности массы.

Методика сводится к следующим основным этапам:

1. Для выбранного промежутка времени осуществляется численное моделирование состояния атмосферы с помощью WRF. Пространственное распределение водных частиц (льда, снега, снежной крупы, дождя, мелких капель и пара) определяется 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, находится на основе промоделированной динамики распределения массовой плотности облачных частиц, с точностью до коэффициента пропорциональности зарядовой и массовой плотности скопления облачных частиц данного типа.
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 по 25 минут для исключения влияния мелкомасштабных неоднородностей строения облака и ошибок моделирования и измерений. Фиттинг осуществляется методом линейной регрессии.

В **Разделе 5.6** действие Методики продемонстрировано на примере исследования электрической структуры облака, обусловившего событие TGE 2016-06-11.

Показано, что облако, обусловившее TGE 2016-06-11, имело двуслойную электрическую структуру, Рис. 4. Верхний слой состоит из частиц снега и имеет отрицательный заряд, нижний слой сформирован частицами снежной крупы и имеет положительный заряд. Плотность заряда на единицу массы равна примерно 0.01 нКл/м^3 для снежной крупы и -0.02 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 Кл в верхнем слое.

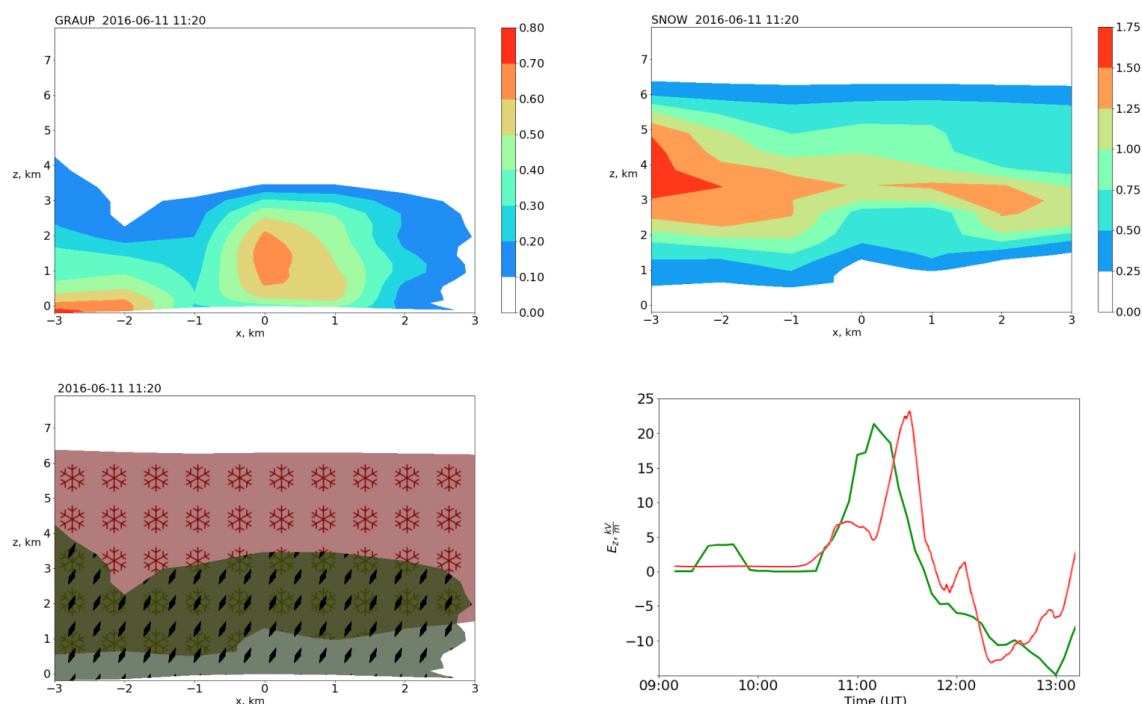


Рис. 4: Характеристика события TGE 2016-06-11: вертикальное сечение распределения массовой плотности снежной крупы и снега в 11:20 UT ($\text{г}/\text{м}^3$); пространственная структура облака в 11:20 UT (красная область — отрицательно-заряженный кластер снежных частиц, зелёная область — положительно-заряженный кластер частиц снежной крупы); сравнение измеренной (красная кривая) и промоделированной (зелёная кривая) динамики приземного электрического поля в промежутке времени 09:00-13:20 UT.

В Разделе 5.7 приведены результаты восстановления структуры облака, создавшего TGE 2017-06-21. 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. Таким образом, верхний зарядовый слой образован и частицами снежной крупы, и частицами снега, которые преобладают.

Раздел 5.8 характеризует электрическую структуру облаков для восьми исследованных событий TGE. 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 промоделированных облаках, создавших TGE, приведены в Табл.3:

Дата	Время	Скорость счёта относ. фона	Ширина нижнего слоя, км	Ширина верхнего слоя, км	Плотность скопления снежной крупы, мг/м ³	Плотность скопления частиц снега, мг/м ³	Плотность положительного заряда, нКл/м ³	Плотность отрицательного заряда, нКл/м ³
2016-05-04	19:05	1.12	5	5	800	1500	0.050	0.020
2016-05-12	13:45	1.16	5	4	150	1300	0.030	0.060
2016-06-08	11:40	1.17	1	4	120	2000	0.020	0.025
2016-06-11	11:20	1.10	2	7	600	400	0.012	0.020
2017-06-21	21:10	1.03	3	5	250	2000	0.017	0.026
2017-08-17	18:55	1.12	3	3	180	1200	0.002	0.001
2017-10-01	18:05	1.05	3	4	150	1000	0.002	0.005
2017-10-10	14:05	1.18	4	5	80	1200	0.001	0.003

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.

Раздел 5.9 посвящён обсуждению возможности оценки электрической структуры облака на основе данных о потоке мюонов, попытка чего была предпринята в [27]. 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.

Глава 6 содержит краткий обзор сведений о структуре облаков, создающих TGF. Показано, что концентрация мелких водяных капель и ледяных частиц в обуславливающих TGF облаках в среднем существенно превышает значения, характерные для облаков, создающих TGE.

В **Главе 7** приводится аналитическое описание развития лавин релятивистских убегающих электронов.

Раздел 7.1 содержит сведения о процессы взаимодействия частиц при разряде с релятивистской обратной связью, почерпнутые из литературных источников. Множество всех процессов структурировано в соответствии с величиной частоты каждого процесса.

В **Разделе 7.2** представлено аналитическое описание разряда без учёта обратной связи, характеризующее динамику численности частиц в составе одной лавины. 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.

В **Разделе 7.3** предложено аналитическое описание развития лавин релятивистских электронов с учётом обратной связи. Найдено однородное квазистационарное решение составленной системы уравнений, соответствующее неизменной во времени концентрации частиц, то есть “установившемуся” режиму развития совокупности лавин. Значения частот основных процессов, перечисленных в Разделе 7.1, приводят к выводу, что вклады в вертикальную компоненту производной напряжённости поля от медленных электронов, убегающих электронов и позитронов соотносятся как $10^4 : 1 : 10^{-1}$ — абсолютно преобладающим оказывается вклад, обусловленный медленными электронами.

В **Разделе 7.4** приведена количественная оценка увеличения проводимости воздуха в области лавин, а также электрического тока, переносимого лавинами. Плотность медленных электронов сильно превосходит плотность быстрых электронов, поэтому из-

менение проводимости определяется именно количеством медленных электронов. Проводимость 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 размере лавины 1 км полный ток, переносимый одной лавиной, равен $I = 10^{-3}$ А.

Разделе 7.5 посвящён оценке распределения заряда в облаке, создающем увеличение потока энергичных частиц, в рамках модели разряда с релятивистской обратной связью. Развитие электронной лавины в области однородного электрического поля допускает аналитическое описание в рамках модели RFD [28], математическое следствие которого позволяет связать относительное увеличение приземного значения потока гамма-излучения с длиной лавины и производной напряжённости электрического поля (вертикальной компоненты) по вертикальной координате в конце лавины. Результаты численного моделирования распространения энергичных частиц в электрическом поле облаков показывают, что релятивистская обратная связь малозначима для развития TGF, и ещё менее значима для формирования TGE. Дополнительным доводом в пользу корректности описания TGE в рамках модели лавин релятивистских убегающих электронов (RREA) без обратной связи может служить выполненное рассмотрение данных о TGE в совокупности со следствием модели RFD.

В **Заключении** перечислены основные результаты работы, состоящие в следующем:

1. Осуществлено численное моделирование (с помощью WRF-model) конвективных явлений, при которых наблюдаются нисходящие потоки гамма-излучения. Для этого определены параметры моделирования, позволяющие наиболее достоверно описывать облака, создающие TGE.
2. Найдены характерные метеорологические свойства облаков, создающих нисходящее гамма-излучение (явление TGE), наблюдаемое на Научной Станции Арагац, [7, 29, 30].
3. Разработана методика оценки электрической структуры облаков, создающих TGE, по результатам приземных измерений электрического поля и с помощью моделирования состояния атмосферы, [7].
4. Определены характерные свойства электрической структуры создающих TGE облаков, [6, 5].
5. Установлено, что основные процессы формирования электрической структуры создающего TGE облака происходят при взаимодействии частиц снежной крупы и снега. Исследована зависимость процесса переноса заряда между частицами снежной крупы и снега от температуры и содержания жидкой влаги в облаке. [29, 31, 5].
6. Создано аналитическое описание развития потоков энергичных частиц в электрифицированных облаках в рамках модели лавин релятивистских убегающих

электронов.

7. Создано аналитическое описание развития потоков энергичных частиц в электрифицированных облаках в рамках модели разряда с релятивистской обратной связью.
8. В рамках модели разряда с релятивистской обратной связью предложена методика оценки распределения заряда в облаке, создающем TGE.

Список литературы

- [1] J. Dwyer, D. Smith, and S. Cummer, “High-energy atmospheric physics: Terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena,” *Space Sci. Rev.*, vol. 177, pp. 133–196, 2012.
- [2] G. Fishman, P. Bhat, R. Mallozzi, L. Horack, T. Koshut, C. Kouveliotou, G. N. Pendleton, C. Meegan, R. Wilson, W. Paciesas, S. Goodman, and H. Christian, “Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin,” *Science*, vol. 264, pp. 1313–1316, 1994.
- [3] A. Chilingarian, “Thunderstorm ground enhancements - model and relation to lightning flashes,” *JASTP*, vol. 107, pp. 68–76, 2014.
- [4] M. Stolzenburg and T. C. Marshall, *Charge Structure and Dynamics in Thunderstorms*, pp. 355–372. New York, NY: Springer New York, 2008.
- [5] E. Svechnikova, N. Ilin, and E. Mareev, “Meteorological characteristics of energetic atmospheric phenomena,” *Physics of Particles and Nuclei Letters*, vol. 21, 10 2020.
- [6] A. Chilingarian, G. Hovsepyan, E. Svechnikova, and E. Mareev, “Comment on “measurement of the electrical properties of a thundercloud through muon imaging by the grapes-3 experiment”,” *Physical Review Letters*, vol. 124, 01 2020.
- [7] E. Svechnikova, N. Ilin, and E. Mareev, “Recovery of electrical structure of the cloud with use of ground-based measurement results,” in *Proceedings of TEPA-2018*, 2018.
- [8] E. Mareev, V. Stasenko, M. Shatalina, S. Dementeva, A. Evtushenko, E. Svechnikova, and N. Slyunyayev, “Russian studies of atmospheric electricity in 2015-2018,” *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 55, pp. 562–572, 11 2019.
- [9] J. Dwyer, “A fundamental limit on electric field in air,” *J. Geophys. Res.*, vol. 30, no. 20, p. 2055, 2003.
- [10] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning Physics and Effects*. Cambridge Univ. Press, 2003.

- [11] “Advanced data extraction infrastructure of aragats space environmental center.” <http://crd.yerphi.am/adei>. [Electronic resource].
- [12] M. Stolzenburg, T. Marshall, and P. Krehbiel, “Initial electrification to the first lightning flash in New Mexico thunderstorms,” *J. Geophys. Res. Atmos*, vol. 120, no. 11, pp. 253–276, 2015.
- [13] D. McGorman and W. Rust, *The Electrical Nature of Storms*. Oxford University Press, Oxford, 1998.
- [14] “Wrf model.” www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model. [Electronic resource].
- [15] C. Saunders, “Charge separation mechanisms in clouds,” *Space Sci. Rev.*, vol. 137, pp. 335–353, 2008.
- [16] G. Thompson, P. Field, R. Rasmussen, and W. Hall, “Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. part ii: Implementation of a new snow parameterization,” *Mon. Wea. Rev.*, vol. 136, pp. 5095–5115, 2008.
- [17] “Wrf model: User’s manual.” www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model, 2019. [Electronic resource].
- [18] T. Marshall, W. Rison, W. Rust, M. Stolzenburg, J. Willett, and W. Winn, “Rocket and balloon observations of electric field in two thunderstorms,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, pp. 20815–20828, 10 1995.
- [19] T. Marshall, M. Stolzenburg, and W. Rust, “Electric field measurements above mesoscale convective systems,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, pp. 6979–6996, 03 1996.
- [20] T. Takahashi, “Electric charge of small particles (1-40 μm),” *J. Atm. Sci.*, vol. 29, pp. 921–928, 1972.
- [21] T. Takahashi, “Electrification of condensing and evaporating liquid drops,” *J. Atm. Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 249–255, 1973.
- [22] T. Takahashi, “Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms,” *J. Atm. Sci.*, vol. 35, no. 8, pp. 1536–1548, 1978.
- [23] T. Takahashi, T. Tajiri, and Y. Sonoi, “Charges on graupel and snow crystals and the electrical structure of winter thunderstorms,” *J. Atm. Sci.*, vol. 56, pp. 1561–1578, 1999.
- [24] C. Saunders, H. Bax-norman, C. Emersic, E. Ávila, and N. Castellano, “Laboratory studies of the effect of cloud conditions on charge transfer in thunderstorm electrification,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 132, pp. 2653 – 2673, 10 2006.

- [25] R. Pereyra, E. Ávila, N. Castellano, and C. Saunders, “A laboratory study of graupel charging,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, pp. 20803–20812, 08 2000.
- [26] C. Saunders and S. Peck, “Laboratory studies of the influence of rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 1031, pp. 13949–13956, 06 1998.
- [27] B. Hariharan, A. Chandra, S. Dugad, S. Gupta, J. Jagadeesan, A. Jain, P. Mohanty, S. Morris, P. Nayak, P. Rakshe, K. Ramesh, B. Rao, L. Reddy, M. Zuberi, Y. Hayashi, S. Kawakami, S. Ahmad, H. Kojima, A. Oshima, and K. Tanaka, “Measurement of the electrical properties of a thundercloud through muon imaging by the grapes-3 experiment,” *Physical Review Letters*, vol. 122, 03 2019.
- [28] J. Dwyer, N. Liu, and H. Rassoul, “Properties of the thundercloud discharges responsible for terrestrial gamma-ray flashes,” *Geophysical Research Letters*, vol. 40, pp. 4067–4073, 08 2013.
- [29] E. Svechnikova, N. Ilin, and E. Mareev, “High-energy events in the atmosphere and their relationship to the electrical structure of the cloud,” in *Proceedings of 16th International Conference on Atmospheric Electricity*, 2018.
- [30] E. Svechnikova, N. Ilin, and E. Mareev, “Meteorological parameters of thunderstorm ground enhancements,” in *Proceedings of EGU General Assembly*, 2020.
- [31] E. Svechnikova, N. Ilin, and E. Mareev, “Characteristic features of the clouds producing high energy flux,” in *Proceedings of 27th IUGG General Assembly 2019, Monreal, Canada*, 2019.