

**Отзыв официального оппонента на диссертацию на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук
Свечниковой Екатерины Константиновны
на тему: «Высокоэнергичные явления в атмосфере
и их связь с электрической структурой облака»
по специальности 01.04.03 – «радиофизика»**

Такое яркое явление природы, как образование грозовых облаков, давно привлекало внимание учёных. Однако, детальное исследование структуры этих облаков и происходящих в них процессов началось относительно недавно, в частности, благодаря открытию путём спутниковых наблюдений гамма-вспышек земного происхождения (terrestrial gamma-ray flash, TGF). В настоящее время физика энергичного излучения облаков земной атмосферы – динамично развивающийся раздел физики атмосферного электричества, возникший около сорока лет назад, объединяющий и дополняющий наработки смежных направлений – структура и формирование облаков, молниевая активность, поведение частиц космических лучей в электрическом поле в атмосфере. Регистрация потоков электронов и гамма-квантов наземными приборами при прохождении облаков над местом наблюдения пополнила набор изучаемых энергичных явлений феноменом увеличения приземного потока электронов и гамма-квантов от грозовых облаков (thunderstorm ground enhancement, TGE). Явление TGF имеет более тесную связь с молниевыми разрядами, в то время как увеличение потока энергичных частиц при TGE характеризуется длительностью от 100 мс до десятков минут и, как правило, при развитии вблизи молниевых разряда прерывается, что является свидетельством возможности развития TGE без молниевой активности и подчёркивает своеобразие механизма TGE. Основная существующая сейчас модель возникновения TGE предполагает лавинное размножение энергичных электронов в крупномасштабном электрическом поле облака, в то время как по крайней мере некоторые TGF связаны с развитием электронных лавин в локальном электрическом поле молниевых лидеров. Таким образом, не вызывает сомнений важность механизма лавин релятивистских убегающих электронов, а вопрос условий и характерных параметров развития лавин при TGE и TGF остаётся открытым.

Малое количество информации об условиях развития лавин в заряженных облаках объясняется тем, что подавляющая часть опубликованных на данный момент

работ о физике TGF и TGE посвящена свойствам энергичного излучения и возможным механизмам его развития, при этом изучение свойств облаков, создающих энергичное излучение, началось около десяти лет назад. Так стало известно географическое и годовое распределение TGF, а также общие свойства строения и состава создающих TGF облаков. Явление TGE, открытое существенно позднее TGF, по этой причине ещё менее изучено с метеорологической точки зрения. Измерения электрического поля, потока энергичных частиц, а также метеорологических величин, постоянно ведущиеся на Исследовательской Станции Арагац в одноимённой горной местности в Армении, обеспечивают возможность исследовать строение и состав облаков, создающих TGE, наблюдающиеся на Станции, где было открыто это явление и где был получен обширнейший на данный момент набор наблюдательных данных.

Перечисленные обстоятельства привели к постановке задачи настоящей диссертации – оценка состава и структуры, метеорологических и электрических свойств облаков, создающих потоки энергичных электронов и гамма-квантов.

В ходе работы проанализированы данные приземных измерений явления TGE, полученные на Станции Арагац, на основе чего получена оценка строения и состава облаков, создающих TGE. Выдающийся результат проделанной работы – разработка методики оценки электрической структуры облака по данным наземных измерений, а также применение этой методики в изучении создающих TGE облаков, в итоге чего впервые были получены характеристики распределения заряда в облаках при TGE. Не менее важным результатом является разработанная аналитическая модель развития лавин релятивистских убегающих электронов с учётом механизма обратной связи, то есть с учётом возможности создания новых лавин позитронами гамма-квантами исходной лавины.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Во введении сформулированы основные цели и задачи работы, обоснована их актуальность, теоретическая и практическая значимость, обсуждена новизна.

Первая глава содержит обзор основных моделей образования гамма-излучения электрифицированными облаками. Рассмотрены механизм убегания электронов, модель лавин релятивистских убегающих электронов, модель молниевое лидера, модель лавин с обратной связью.

Вторая глава посвящена явлению TGE и методам его исследования. Обсуждены ключевые свойства явления TGE и измерительной аппаратуры, применяемой для изучения TGE на Станции Арагац. Приведён краткий обзор методов изучения состава,

строения и электрической структуры облаков. Подробно обсуждены возможности применения численного моделирования состояния атмосферы для изучения строения облаков, создающих TGE. Описан выбор параметров моделирования состояния атмосферы с помощью Weather Research and Forecasting model, показано применение результатов наземных измерений и радиолокационных данных для верификации моделирования. Разработан метод верификации по измерениям распределения радиолокационной отражаемости. Сделан вывод о возможности корректного моделирования конвективных явлений, сопровождающихся TGE, без учёта аэрозольных частиц.

В третьей главе содержатся результаты оценки метеорологических и электрических свойств облаков. На примере двух интенсивных событий TGE подробно описано строение и состав создавших их облаков на основе моделирования WRF. Показано, что облако имеет двуслойную структуру – нижняя часть образована частицами снежной крупы, верхняя – скопление частиц снега. Описана сезонная вариативность создающих TGE облаков: зимние облака образованы в основном частицами снега и льда и имеют меньшую плотность гидрометеоров по сравнению с облаками тёплого сезона, способными к созданию интенсивных событий TGE. В ходе анализа микрофизических закономерностей накопления заряда на водных частицах на основе результатов моделирования показано, что в характерных для TGE облаках направление переноса заряда между частицами снежной крупы и снега преимущественно одинаково во всём объёме облака. Предложена методика оценки электрической структуры создающего TGE облака по измерениям динамики приземной напряжённости электрического поля. Представлены результаты анализа электрической структуры конвективных явлений, сопровождавшихся интенсивными событиями TGE, наблюдавшимися на Станции Арагац: для создающих TGE облаков характерна двуслойная структура с нижним положительным зарядом и верхним отрицательным. Обсуждена возможность оценки распределения заряда в облаке по результатам приземных измерений потока мюонов, показана важность учёта влияния на движение мюонов электрического поля во всех частях облака.

В четвёртой главе приведено аналитическое описание динамики лавин убегающих электронов с учётом механизма обратной связи. Описан режим квазистационарного развития электронных лавин. На основе разработанной аналитической модели показано, что развитие лавин может создавать дополнительную проводимость, сопоставимую с исходной проводимостью воздуха до развития лавин.

Предложена методика оценки электрической структуры облака по данным наземных измерений напряжённости электрического поля и потока энергичных частиц.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В качестве недостатков диссертационной работы можно указать погрешности в оформлении.

На страницах 46 и 48 при обсуждении радарных данных ссылки на рисунки 28 и 15 появляются именно в таком порядке, то есть непоследовательно. На рисунке 17 отсутствует комментарий об отложенной по вертикальной оси величине и её размерности. На рисунках 18 и 19 отсутствует описание цветовой шкалы.

На рисунке 43 две части изображения не соответствуют друг другу и требуют смещения вдоль вертикальной оси, так как в изображённом слева двуслойном распределении заряда максимум электростатического потенциала располагается в области положительного заряда, а не между зарядами, как показано на высотном профиле потенциала в правой части рисунка.

При описании метода сравнения промоделированного распределения радиолокационной отражаемости с измеренной на странице 74 не хватает пояснения того, что рассматривается именно относительная площадь, соответствующая выбранным значениям отражаемости.

В главе 4, содержащей аналитическое описание электронных лавин, не достаточно полны описания предложенных моделей, а также не хватает пояснений о способах получения аналитических решений исходных уравнений. Есть опечатки и неточности: так, на странице 121 при описании двух величин – количества электронов и функции источника – их обозначения записаны в обратном порядке. Кроме того, отсутствует определение функции S .

В целом диссертация представляет собой законченное исследование, отражает большой объём проделанной автором работы и содержит новые важные результаты по актуальной теме. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, в высокой степени обоснованы, их достоверность подтверждена сравнением с результатами измерений и независимых теоретических исследований. Представленные в диссертации Е.К. Свечниковой результаты опубликованы в ведущих отечественных и международных научных журналах, значимы и важны для развития современной

физики атмосферного электричества. Содержание автореферата соответствует названию и содержанию диссертации.

Диссертация Е.К. Свечниковой "Высокоэнергичные явления в атмосфере и их связь с электрической структурой облака" отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «радиофизика».

Таким образом, соискатель Свечникова Екатерина Константиновна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «радиофизика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Почтовый адрес: 603022, г. Нижний Новгород, проспект. Гагарина 23

Гавриленко Владимир Георгиевич,

01.10.2021

Контактные данные:

тел.+7(951)9103450, e-mail: vgg@rf.unn.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.03 – Радиофизика, включая квантовую радиофизику

Адрес места работы:

603022, г. Нижний Новгород, проспект. Гагарина 23, корпус 1.
радиофизический факультет федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

тел.+7(951)9103450, e-mail: vgg@rf.unn.ru

Я, Гавриленко Владимир Георгиевич, выражаю свое согласие на обработку персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Подпись доктора физико-математических наук, профессора радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Гавриленко Владимира Георгиевича
удостоверяю:

профессор Александр Владимирович

