

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Саргсяна Балабека**

**на тему: «Энергетические спектры электронов и гамма-лучей в диапазоне энергий 0,3-100 МэВ во время связанных с усилением грозового наземного возрастания»
по специальности 01.04.16. «Физика ядра, элементарных частиц и космических лучей»**

Диссертация Балабека Саргсяна посвящена всестороннему экспериментальному исследованию энергичных процессов в грозовых областях, связанных со значительным и длительным увеличением потоков заряженных частиц, гамма-квантов и дополнительным оптическим излучением транзиентного характера. Направление работы является крайне актуальным, т.к. несмотря на годы исследований, окончательных ответов о механизмах генерации молниевых разрядов, образования электромагнитных излучений в широком диапазоне энергий, до сих пор нет.

Работа выполнена на уникальном высокогорном комплексе экспериментального оборудования станции Арагац, которое позволяет проводить измерения различных метеорологических, оптических, электромагнитных, радиационных параметров непосредственно вблизи грозового облака. Автор диссертации принял активное участие как в создании этого комплекса, так и обработке полученных данных.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и описания основных результатов, полученных в диссертации. В первой главе описаны основные источники естественной радиации вблизи поверхности Земли. Особое внимание уделяется вопросу циркуляции радиоактивного радона и продуктов его распада, проведена оценка вклада отдельных изотопов в спектр и интенсивность гамма-излучения в диапазоне энергий 0–3 МэВ. Показано, что низко энергичная радиация присутствует в течение часов и связана с распадом продуктов радона, а высокоэнергичная часть – продукт ускорительных процессов в приземном грозовом электрическом поле. Получены спектры для обеих составляющих и если в диапазоне 0.2–2 МэВ спектр описывается экспоненциальной зависимостью, то в диапазоне 3–50 МэВ – он становится степенным.

Вторая глава посвящена модуляции потока позитронов во время гроз. Исследованы события как с положительным, так и с отрицательным приземным электрическим полем (знак поля определяет направление ускорения заряженных частиц). Показано, что доля гамма-излучения с энергией 511 кэВ, образованная при ускорении позитронов, составляет около 4 %. Это показывает важную роль нижнего положительно заряженного слоя в облаке, приводящего

к ускорению позитронов в области между облаком и поверхностью Земли.

В третьей главе диссертации описаны основные причины резкого усиления естественного гамма-излучения в грозовых атмосферах на вершинах гор, определенные автором в ходе проводимых экспериментов. Показано два дополнительных источника естественного гамма-излучения: Thunderstorm ground enhancements (TGE) и дочерние продукты распада радона, поднятые в атмосферу приземным электрическим полем во время гроз. TGE могут усиливать интенсивность гамма-излучения в несколько раз и длиться несколько минут, а продукты распада радона – на 20–30% в течение 2–3 часов.

В четвертой главе диссертации подробно изложено исследование новых транзиентных световых явлений, которые нельзя отнести ни к одному из известных высоко атмосферных типов (спрайт, джет, эльф и пр.), и которые не являются коронным разрядом на металлических конструкциях вблизи станции. Вероятнее всего это первые в мире оптические наблюдения флуоресценции лавин убегающих электронов, которые позволяют детально проследить структуру и динамику процессов ускорения и распространения энергичных заряженных частиц вблизи грозовых облаков, а также сделать оценки пространственных масштабов явления, что и делает автор работы.

В пятой главе приведены результаты исследования вертикальной и горизонтальной структуры приземного грозового электрического поля, при помощи измерения потоков заряженных частиц. Показано, что область ускорения электронов (электрические поля) существуют в течение часов в области, превышающей десятков километров. При медленном и плавном измерении электрического поля поток частиц постоянный. При резких изменениях приземного поля наблюдаются т.н. TGE)

Шестая глава описывает новую и уникальную сеть детекторов заряженных частиц SEVAN, размещенную на горных вершинах центральной и восточной Европы и Армении, а также ряд измерений крупнейших TGE, наблюдаемых спектров электронов и гамма-квантов.

Достоверность полученных результатов определяется надежностью и тщательной калибровкой используемого комплекса оборудования, моделированием в общепринятых и широко используемых пакетах GEANT4 и CORSIKA. Результаты неоднократно докладывались и обсуждались на международной конференции ТЕРА. Полученные результаты являются новыми, аналогов таких длительных и комплексных измерений на высокогорных станциях в мировой научной практике практически нет.

Несмотря на большой объем проделанной работы и ясное описание разнообразных результатов, остается несколько вопросов, которые хотелось бы задать автору диссертации:

- 1) Однако определение высоты свечения делается на основе оценки высоты нижней границы облачного покрова, как верхнего предела. Не понятно, почему не рассматривается возможность того, что световые вспышки

являются внутриоблачными процессами, т.н. compact intracloud discharge (компактные внутриоблачные разряды), initial breakdown (первоначальный пробой), то, что на сегодняшний день получило в литературе название BLUES – синие вспышки в облачном покрове.

- 2) В диссертации представлены многочисленные примеры свечения, однако не приведено никакой классификации событий при всем их разнообразии. Вероятно, это стоит сделать, либо по морфологическим признакам свечения, либо по наличию возмущения электрического поля или потоков энергичных электронов и гамма-квантов.
- 3) Можно было бы более подробно привести описание используемого оптического оборудования. В частности, при описании камер необходимо дать спектральные характеристики, какова чувствительность в разных частях спектра, какие используются фильтры, объективы. Это важно для понимания того, почему наблюдается именно синее свечение. Также хорошо бы для пикселей, в которых наблюдаются вспышки, привести кривые свечения спектральных каналов камеры R, G и B, и их отношение. Тогда будет яснее сигнал какого канала превалирует.
- 4) Возможно, имело смысл вынести в отдельную главу описание всей используемой аппаратуры, чтобы продемонстрировать весь мощный экспериментальный комплекс на высокогорной станции Арагац. Важные характеристики аппаратуры равномерно распределены по тексту диссертации.
- 5) Хочется также обратить внимание на интересное утверждение в первой главе: «Thus, without this "useless" local area of positive charge, our planet may be quiet, dark, and lifeless.». К сожалению, оно приводится без дальнейших комментариев относительно того почему отсутствие нижнего положительного слоя в облаке может быть столь важным для существования жизни на Земле.

Также, отмечу некоторые небольшие замечания по тексту диссертации:

- 1) На странице 56 дважды вводится сокращение TLE.
- 2) На странице 59 в нижнем абзаце дважды через предложение повторяется одна и та же мысль, что свечение вызвано лавинами убегающих электронов: The glow observed in April 2020 demonstrates a complicated pattern *like multiple avalanches from runaway electrons* (inset on the left of Figure 37). ... The image at maximal flux *resembles optical radiation from multiple runaway avalanches*.
- 3) На странице 58 не очень понятно описано видны ли коронные разряды на металлических структурах или нет. С одной стороны говорится, что «The corona discharges on high metallic structures plenty on the station can produce such a picture», а с другой – «we do not observe in Figure 36 any discharge on these structures». При этом стоит отметить, что на рис. 36 все-таки можно разглядеть тусклое диффузное свечение у одной из металлических мачт.
- 4) В подписи к рисунку 36 говорится о том, что на рисунке 39 показаны мачты (With red ovals, we denote the two highest metallic structures on the station: the

mast behind the МАКЕТ experimental hall and the chimney behind the hotel building, shown in Figure 39.), а на рис. 39 их нет. При этом, на самом рисунке 39 показаны снимки трех камер, а один из них пропал и замещен схемой наблюдения, что не обсуждается в тексте.

- 5) На странице 73 сразу несколько опечаток в названиях радиоактивных элементов: ^{222}Rn , ^{214}Pb .
- 6) Некоторые другие опечатки также присутствуют в тексте.

Замечания и вопросы относятся либо к незначительной корректировка текста, либо высказаны в качестве пожеланий, которые стоит иметь в виду в продолжение работы и обусловлены интересом оппонента к результатам, описанным в диссертации.

Таким образом, соискатель Балабек Саргсян безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16. «Физика ядра, элементарных частиц и космических лучей»

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией космических лучей предельно высоких энергий
Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В.
Скобельцына Московского государственного университета имени М. В.
Ломоносова (НИИЯФ МГУ)

П.А. Климов

«23» декабря 2024 г.

Подпись сотрудника НИИЯФ МГУ Климова П.А. удостоверяю:

Учёный секретарь НИИЯФ МГУ
к.ф.-м.н.



Е. А. Сигаева