

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»

В последние годы на стыке физики космических лучей и физики атмосферы сложилось новое направление исследований – атмосферная физика высоких энергий. Традиционно за «высокие энергии» в атмосфере «отвечали» космические лучи. Однако относительно недавние открытия таких явлений, как вспышки гамма-излучения из атмосферы Земли (Terrestrial Gamma-Ray Flash, TGF), увеличение потоков электронов и гамма квантов высоких энергий во время грозы (Thunderstorm Ground Enhancement, TGE), пучки электронов высоких энергий из атмосферы (Terrestrial Electron Beam, TEB) показали, что процессы ускорения частиц могут происходить непосредственно в атмосфере Земли, и предположительно связаны с электрически активными облаками и молниевыми разрядами. Следует отметить, что указанные явления достаточно компактны во времени, их длительности лежат от десятков и сотен микросекунд (TGF) до десятка минут (TGE), поэтому можно говорить о транзиентных энергичных процессах в атмосфере Земли.

Несмотря на то, что изучение указанных процессов ведется в последнее время достаточно интенсивно, до сих пор нет полной ясности относительно их природы. Принято считать, что генерация гамма излучения во время как TGF, так и TGE обусловлена так называемыми лавинами релятивистских убегающих электронов. При этом природа начальных частиц, порождающих такие лавины не достаточно ясна, и это

справедливо не только для всплесков, регистрируемых в космосе, но также и для тех, которые регистрируются наземными детекторами. Эти начальные частицы могут быть непосредственно связаны с явлением молнии, будучи «тепловыми убегающими» электронами, ускоренными в сильном переходном электрическом поле молниевых лидеров, либо могут происходить от широких атмосферных ливней (ШАЛ), вызванных космическими лучами. Существует также необъясненное несоответствие между глобальным распределением TGF и молний, заключающееся в том, что большинство TGF происходит на низких географических широтах. Похожая неопределенность связана и с размером области ускорения электронов. Она может быть внутри грозового облака на концах молниевых лидеров, или быть сопоставимой с размером крупномасштабных электромагнитных полей грозовых облаков. Вполне возможно, что все вышеперечисленные механизмы работают, но до сих пор вопросы относительно интенсивности и спектра ускоряемых частиц, главным образом электронов, также как и о пределе ускорительного режима, остаются до конца не ясными.

Отдельно следует отметить такое явление, как TGE, которое наблюдается в основном в экспериментах на высокогорных станциях. Большинство данных об этом явлении получено в ходе уникальных наблюдений на установках, расположенных на горе Арагац (Армения), которые первоначально предназначались для исследований по физике космических лучей. На равнинах во время гроз регистрируется гамма-излучение, обусловленное только распадом дочерних изотопов радиоактивного радона ^{222}Rn , при этом тормозное излучение лавин релятивистских убегающих электронов не наблюдается. Возможной причиной этого могут быть благоприятные условия регистрации электронов и гамма-квантов высоких энергий на высокогорных станциях, поскольку там регистрирующая аппаратура может находиться

непосредственно вблизи облака. Однако причина может заключаться и в особой электрической структуре грозовых облаков в горной местности.

В связи с этим автор диссертационной работы поставила задачу определить строение и метеорологические свойства облаков, создающих потоки энергичных электронов и гамма-квантов. Для этого для анализа были взяты данные наблюдений на станции Арагац, полученные за 10 лет – с 2011 по 2020 годы. Автор провела оптимизацию параметров модели Weather Research and Forecasting Model (WRF Model), которая позволяет получать метеорологические свойства облаков, создающих потоки низходящих энергичных частиц во время гроз. Автором было показано, что облака, создающие события типа TGE, состоят преимущественно из снежной крупы и снега, и имеют двухслойную структуру. Дана оценка высоты слоев над поверхностью Земли и определены значения плотности скоплений частиц снежной крупы и снега. Также было показано, что в отличие от обычных облаков, которые имеют трехслойную структуру, облака, с которыми связаны наблюдавшиеся TGE, имеют двухслойную электрическую структуру – состоят из нижнего слоя положительных зарядов и верхнего слоя отрицательных. В диссертации дана оценка плотности электрического заряда в этих слоях. Автор разработала аналитическую модель развития электронных лавин, с помощью которой показала, что развитие лавин может существенно повысить проводимость среды. При этом учет измерений потоков энергичных частиц наряду с измерениями приземного электрического поля дает более высокие значения плотности электрического заряда в облаке, что может свидетельствовать о влиянии неоднородности электрического поля на развитие лавины.

Автором диссертационной работы получены важные новые научные результаты. В частности, определены параметры модели WRF, позволяющие описывать события, создающие TGE на горе Арагац,

впервые найдены характерные особенности облаков, порождающих TGE. Также впервые разработана методика оценки электрической структуры облака на основе измерений приземного электрического поля и моделирования состояния атмосферы, определена электрическая структура облаков, с которыми связаны TGE, наблюдавшиеся на горе Арагац.

Диссертационная работа Е.К. Свечниковой не лишена некоторых недостатков. Так, в Гл. 1 на с. 20 приведено некорректное утверждение «кванты тормозного излучения лавины испытывают распад». Но гамма-квант не может испытывать распад, по-видимому, автор имела в виду рождение электрон – позитронной пары.

В Гл. 2, посвященной описанию методик измерения возрастных потоков частиц и квантов, приземного электрического поля, а также моделированию состояния атмосферы приводится определение явления TGE, как «увеличение потоков электронов и фотонов с энергиями 3 – 100 МэВ длительностью от 100 мс до десятков минут». В то же время, на предыдущей странице (с. 22) говорится об увеличении потока с «характерной длительностью около 100 мкс». Но такая длительность типична для TGF, но не TGE. В этой же главе приводятся ссылки на то, что явления типа TGE наблюдались не только на горе Арагац, но и на других высокогорных станциях и даже на равнинах. Неплохо было бы привести типичные значения длительностей подобных событий. К примеру, на высокогорной станции ФИАН «Тянь-Шань» во время гроз наблюдались возрастания потоков гамма-излучения длительностью порядка нескольких миллисекунд, что много меньше типичной длительности TGE на горе Арагац, поэтому такие события вряд ли можно отнести к типичным TGE.

При описании методов регистрации энергичных электронов и гамма-квантов указано, что детектор – сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) имеет площадь «около 0.032 м^2 », т.е. около 320 см^2 , с другой стороны приведены размеры кристалла $120 \times 120 \times 240 \text{ мм}^2$, причем из рис. 6 следует, что

площадь входного окна детектора именно $120 \times 120 \text{ мм}^2$, т.е. 144 см^2 . Так же следовало бы объяснить, чем обусловлен нижний порог регистрации электронов - 3 МэВ, и указать, каков нижний порог регистрации гамма-квантов.

При моделировании параметров атмосферы с помощью модели WRF погрешность моделирования оценена в 20%. Следовало бы подробнее обосновать, почему было взято именно такое значение для оценки погрешности, и что значит «погрешность моделирования»?

В Гл.3, в которой анализируется структура облаков, создающих электронные лавины, в качестве аргумента в пользу согласия измеренных и промоделированных значений температуры приводится рис. 27. Следовало бы привести какие-либо количественные оценки достоверности такого согласия на основе стандартных методов статистического анализа, поскольку из приведенного рисунка «на глаз» довольно трудно оценить достоверность согласия.

Также не очень понятно, почему в подписи к рис. 30 сказано, что приведенные на нем кривые получены для моментов 10:40, 10:45, 10:55 UT, а на с. 76, где речь идет об этом же рисунке, уже указаны моменты времени 11:40, 11:45, 11:50 UT?

В Гл. 4, посвященной аналитическому описанию лавин убегающих электронов, содержится несколько некорректных и жаргонных выражений. В частности, на с. 114 утверждается, что «быстрые и медленные электроны прилипают к нейтральным молекулам», термин «прилипание» не вполне уместен по отношению к ультрарелятивистским частицам, которыми являются «быстрые» электроны с энергией в несколько МэВ. На с. 115 содержатся терминологически некорректные утверждения типа «энергичный квант распадается на электрон-позитронную пару» и «гамма-кванты распадаются на позитрон и медленный электрон».

В таблице 6 указано, что положительно заряженные ионы возникают в результате аннигиляции. Следовало бы пояснить, какие процессы имеются в виду, поскольку буквально термин «аннигиляция» относится к взаимодействию частиц и античастиц, в результате которого могут рождаться нейтральные бозоны, в случае электрон – позитронной аннигиляции - преимущественно гамма-кванты.

Текст диссертации содержит ряд опечаток и стилистических погрешностей. В большинстве рисунков имеются надписи на английском языке (например, единицы измерения на рис. 49, 50 на с. 135). На многих панелях они весьма мелкие и трудно читаются.

Тем не менее, указанные недостатки не умаляют большой работы, проделанной автором и важности полученных им результатов. Тема диссертации является актуальной. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, в высокой степени обоснованы, их достоверность подтверждается расчетами, а также сравнением полученных результатов с данными других экспериментов и теоретическими моделями. Представленные в диссертации Е.К. Свечниковой результаты являются новыми и опубликованы в ведущих отечественных и международных научных журналах и имеют большое значение для дальнейшего развития современной радиофизики и физики атмосферы. 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:

Свертилов Сергей Игоревич,



доктор физико-математических наук,
специальность 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия,
ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института
ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,
профессор физического факультета
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»

Почтовый адрес:

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова,
д.1, стр. 2, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени
Д.В. Скобельцына
тел.: 7(926)1119304,
e-mail: sis@coronas.ru

Я, Свертилов Сергей Игоревич, выражаю свое согласие на обработку
персональных данных, связанных с защитой диссертации.



Подпись доктора физико-математических наук, ведущего научного
сотрудника Научно-исследовательского института ядерной физики имени
Д.В. Скобельцына, профессора физического факультета федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова» Свертилова Сергея Игоревича
удостоверяю:

Ученый секретарь Научно-исследовательского института ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова,



Е.А. Сигаева

20.09.21