

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени**

**доктора физико-математических наук**

**Климова Павла Александровича**

**на тему: «Пространственно-временная структура излучения атмосферы**

**земли в ближнем УФ-диапазоне по данным орбитальных и наземных**

**экспериментов»**

**по специальностям**

**1.3.1. Физика космоса, астрономия**

**и 1.6.18. Науки об атмосфере и климате**

Астрофизика — это область исследований, которая находится в точке пересечения физики частиц, астрономии, и физики высоких энергий в атмосфере. Развитие современной астрофизики ультравысоких энергий связано с освоением все новых диапазонов энергий и созданием новых экспериментальных методов детектирования частиц. Накопление экспериментальных фактов о энергетических спектрах космических лучей ультравысоких энергий (КЛУЭ) обсерваторией космических лучей Пьера Оже (AUGER) и установкой Telescope Array вновь обратило всеобщее внимание на одну из самых важных проблем астрофизики высоких энергий — вопросу происхождения космических лучей сверхвысоких энергий.

Впервые КЛУЭ были зарегистрированы примерно 35 лет назад в эксперименте Volcano Ranch, руководимой Джоном Линсли. В дальнейшем, частицы, превышающие так называемую границу Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГКЗ,  $E > 50 E_{\text{eV}}$ ), были зарегистрированы крупными наземными установками, регистрирующими Широкие Атмосферные Ливни (ШАЛ): электроны и мюоны, дошедшие до установки (AGASA, HAVERA PARK, AUGER) или флуоресцентное излучение, возникающее при прохождении ливня в атмосфере (Fly's Eye, HiRes, Yakutsk, Auger).

Не один из стандартных астрономических сценариев не в состоянии пока принять вызов наблюдений КЛУЭ: галактические источники должны давать гораздо более анизотропный поток по сравнению с наблюдаемым, а внегалактические источники слишком далеки, чтобы частицы сохранили энергию на своем пути до солнечной системы.

Для преодоления этих трудностей используется альтернативный подход, новые представления современной физики высоких энергий. В рамках этого подхода в качестве возможного источника КЛУЭ рассматриваются распады гипотетических космических струн (топологических дефектов) при их пересечении, самопересечении и коллапсе замкнутых контуров, а также при аннигиляции пар первоначальных монополю-антимонполей. Другая возможность предложена в недавно рассмотренной концепции долгоживущих сверхтяжелых реликтовых частиц. Однако, эти модели пока также не оправдали себя, в основном из-за трудностей с сохранением энергии при распространении и взаимодействиях в галактическом и межгалактическом пространстве.

Поэтому, логичным следствием попыток преодоления теоретических трудностей является обращение к моделям Активных Галактических Ядер (Сверхмассивных Черных Дыр), в близости к которым происходят самые энергетические процессы во Вселенной. Основная трудность в этом подходе связана с построением моделей позволяющих получать интенсивные потоки частиц сверхвысоких энергий и с транспортом этих частиц через горячую плазму аккреционного диска. Следует учесть также потери энергии в взаимодействиях в межгалактическом и галактическом пространстве, а также отклонения заряженных частиц межгалактических и галактических магнитных полях. Все эти процессы трудно моделировать из-за неопределенности в значениях параметров характеризующих напряженности магнитных полей, в энергетических процессах аккрекции и выброса релятивистских струй из областей окружающих сверхмассивные черные дыры.

В этих условиях, когда решение прямой задачи физики космических лучей - генерации и транспорта частиц до экспериментальных установок – невозможно, единственным способом сопоставления теоретических представлений и экспериментальных данных является статистический анализ направлений прихода частиц сверхвысоких энергий.

Проецирование этих направлений на галактическую сферу позволяет количественно оценить гипотезы о тех или иных возможных источниках КЛУЭ. Однако, из-за очень малого значения интенсивности космического излучения при высоких энергиях - менее одной частицы на км<sup>2</sup> в год с энергией выше 10 ЕэВ, несмотря на строительство гигантских обсерваторий, набранная статистика не позволяет достоверно определить источники частиц ультравысоких энергий. Больше статистики с улучшением качества данных за счет постоянной модернизации существующих обсерваторий, а также будущих экспериментов, таких как Probe of Extreme Multi-Messenger Probe Of Extreme Multi-Messenger Astrophysics (РОЕММА, [1]) Global CosmicRay Observatory (GCOS, [2]).

Орбитальный эксперимент РОЕММА, планируемый как астрофизический зонд НАСА, состоит из двух идентичных телескопов, предназначенных для регистрации ультрафиолетового излучения (атмосферную флуоресценцию) и Черенковского излучения от восходящих ШАЛ от КЛУЭ и нейтрино с энергией > 20 ЕэВ. Для исследования различных фонов, мешающим регистрации КЛУЭ и нейтрино по каналам воздушной флуоресценции и оптического Черенковского излучения, в мае 2023 был запущена Космическая обсерватория Extreme Universe на воздушном шаре сверхвысокого давления (EUSO-SPB2) - первопроходческая миссия, осуществляемая коллаборацией JEM-EUSO. К сожалению, полет завершился через 37 часов ввиду утечки гелия. Однако в рамках предшественника EUSO-SPB2, проекта JEM-EUSO - Joint Exploratory Missions for Extreme Universe Space Observatory, были проведены длительные

и важные измерения, в проведении которых ведущую роль сыграл автор диссертации. Диссертационная работа посвящена именно описанию созданного инструментария, проведению измерений и изложению полученных результатов. Эти результаты неминуемо носят междисциплинарный характер, благодаря ввиду глобального характера происходящих в земной атмосфере процессов.

Во **введении** диссертационной работы сформулированы проблем идентификация возможных источников космических лучей ультравысоких энергий, рассмотрены процессы ускорения частиц в источниках, распространение космических лучей в межгалактическом пространстве. Проанализирована гипотеза о том, что космические лучи ультравысоких энергий рождаются в активных галактических ядрах, проанализированы предыдущие исследования этой гипотезы. Описана структура диссертационной работы и приведены основные результаты, представленные к защите.

**В первой главе** приводятся характеристики аппаратуры по исследованию УФ-свечения атмосферы. Детекторы излучения устанавливались на Университетские спутники, и на международную космическую станцию. Телескоп ТУС являлся первой в мире реализацией орбитального детектора КЛУЭ, на котором впервые были опробованы алгоритмы выделения событий ШАЛ.

**Во второй главе** показано, что рассеянное излучение Луны и звезд, на порядок—два более интенсивно чем собственное свечение атмосферы, вызванное атмосферными процессами. Обнаружена корреляция интенсивности, и ширина области свечения от геомагнитной активности. Показано, что основное влияние на вариации УФ-излучения оказывает внешняя освещённость облачного покрова и освещённость земной поверхности.

**В третьей главе** с помощью детектора ТУС на борту спутника Ломоносов показана принципиальная возможность регистрации ШАЛ по флуоресцентному свечению, регистрируемому с орбиты Земли. Проверены алгоритмы поиска и реконструкции событий ШАЛ. Существенное повышение фона, наблюдалось над областями грозowymi районами и городскими конгломератами, что приводит к тому, что эффективное время работы прибора уменьшается в 5–10 раз. В ходе проведения эксперимента были зарегистрированы треки энергичных частиц, вспышки грозовой природы, высоко атмосферные пульсации в зоне полярного овала, метеоры, сигналы антропогенного происхождения. Обобщение этой информации поможет при планировании орбитальных экспериментов следующего поколения.

**В четвертой главе** анализируются события грозовой активности. Били проанализированы события длительностью от 1 до 100 мс. Построена частотная карта событий, которая совпала с картами грозовой активности. Произведены оценки яркости событий, достигающие сотен мегаватт. В экспериментальных данных было обнаружено 26 событий ELVES (достигающее высот 80–100 км кольцо, с диаметром до 400 км, и временем развития – менее 1 мс). Был произведен поиск внегрозowych событий не коррелированных с регистрацией всемирных сетей локации молний WWLLN и Vaisala GLD360 и при отсутствии облачного покрова в поле зрения прибора. Подобные редкие события не нашли пока удовлетворительного объяснения.

**В пятой главе** анализируется пространственно-временная структура УФ-свечения в авроральной зоне, модулируемая высыпаниями электронов с энергией 1–10кэВ. Детектором ТУС было обнаружено 66 событий с авроральными УФ-пульсациями, коррелирующие с геомагнитной активности. Показано, что УФ-события совпадают с максимумом потока частиц, измеренного детектором ДЭПРОН и приборами спутника «Метеор-

M2». Исследования этого эффекта продолжились с помощью изображающих фотометров в обсерватории «Верхнетуломская» с сентября 2021 года.

В **Заключении** сформулированы и обсуждаются основные результаты работы.

Создан инструментарий для регистрации пространственно-временных и энергетических характеристик УФ-свечения атмосферы. Созданы методики калибровки каналов фотоприемника в ходе эксперимента. Проведена классификация множества событий УФ-свечения атмосферы. Произведен анализ и по яркости вспышек, и по их длительности, и по географии. Выявлены корреляции с геомагнитной и грозовой активностью. Показана принципиальная возможность орбитальной методики регистрации ШАЛ с помощью телескопа ТУС, который является первой в мире (и пока единственной) реализацией орбитального детектора космических лучей предельно высоких энергий. Выявлены УФ явления внегрозовой природы. Замечены корреляции УФ-пульсаций с повышенными потоками электронов ( $>100$  кэВ) в авроральной зоне.

Тема диссертации, несомненно, чрезвычайно интересна и важна для планирования и проведения космических экспериментов следующего поколения. Создание системы детекторов, с широким полем зрения, миллисекундным временным разрешением, и глобальный охватом всего Земного шара, само по себе представляет решение сложной научной задачи. В диссертации глобальные измерения свечению атмосферы анализируются не только в ракурсе будущих экспериментов космических лучей ультравысоких энергий, но и в рамках геофизических задач. Что показывает синергетический характер космических экспериментов: от фундаментальных проблем ускорения космических лучей до грозowych явлений и геомагнитных бурь. Павел Климов в диссертационной работе показал широкую эрудицию в объединении нескольких научных направлений в рамках единого подхода. Что еще раз свидетельствует о первостепенной важности проведения продуманной, хорошо подготовленной и последовательной программы

проведения системы измерений. В этой связи не могу не упомянуть Михаила Игоревича Панасюка, который разработал и реализовал программу спутниковых экспериментов в МГУ.

В диссертации такого объема и охвата материала неизбежны недостатки.

Во введении отмечен ряд важных нерешенных вопросов о взаимосвязи гамма- и оптических транзиентов, о механизме образования энергичных гамма-квантов, о взаимосвязи между широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) и оптическими транзитами.

К сожалению, несмотря на значительный прогресс в этих исследованиях, см. например, [3], проблематика недостаточно отражена в диссертации.

Там же указано: «зарегистрировано более десятка тысяч событий с энергией, превышающей предел Грейзена- Зацепина-Кузьмина (ГЗК)  $\sim 5 \cdot 10^{19}$  ЭВ». К сожалению, это не так: число событий зарегистрированных обсерваторией Пьера Оже (выше 32 ЕэВ) с 2004 г. по 01 января по 31 декабря 2020 г. и обнаруженных телескопом Telescope Array с 2008 г. по 11 мая по 10 мая 2019 г. (выше 40.8 ЕэВ) включает 2625 и 315 событий соответственно [4]. Число событий с энергиями выше порога ГЗК вряд ли превышает 1000. В случае регистрации более десятка тысяч событий проблема с источниками КЛУЭ была бы решена.

Во введении к 4 главе упомянуты среди наиболее интересных для наблюдения с орбиты Земли, первоначальные пробои (Initial Breakdown, IB) и компактные внутриоблачные разряды, КВП (Compact Intracloud Discharges, CID). Однако, в диссертации не отражено наблюдались ли эти процессы, и если нет, то по какой причине.

В разделе «Теоретическая и практическая значимость» отмечено, что «по соотношению интенсивности излучения различных линий

молекулярного азота можно судить об основном процессе ускорения электронов до релятивистских энергий: лавины релятивистских убегающих электронов в крупномасштабном, но относительно слабом электрическом поле грозовой области, либо ускорение в сильном локальном поле стримера».

К сожалению, автор не раскрывает эту тему в диссертационной работе, хотя последние измерения монитора атмосферно-космических взаимодействий (ASIM) на борту Международной космической станции позволяют отвергнуть гипотезу об ускорении в локальном поле стримера [3]. Земные гамма-вспышки являются предвестниками атмосферных разрядов, и только атмосферное электрическое поле ускоряет электроны.

В нескольких местах диссертационной работы отмечалась важность исследования взаимосвязи оптических и гамма-излучений в грозовых процессах. В этом отношении, будет полезно рассмотреть возможность продолжения оптических измерений на высокогорной станции Арагац, где зарегистрированы УФ-свечения коррелированные с интенсивными потоками МэВных электронов.

Естественно, не все задачи решены, и многое планируется решить в рамках проектов на Российской орбитальной станции, в которых, несомненно, опыт подытоженной в диссертации Павла Климова будет иметь первостепенное значение.

## **Литература**

[1] A. V. Olinto, J. Krizmanic, and P. Collaboration. The roadmap to the POEMMA mission. In Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2021), Vol. 395, p. 976 (2021). doi: 10.22323/1.395.0976.

[2] J. R. Hörandel. GCOS — the global cosmic ray observatory. In Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2021), Vol. 395, p. 310 (2021). doi: 10.22323/1.395.0310. <http://particle.astro.ru.nl/ps/gcos-icrc21.pdf>.



[3] Skeie, C. A., Østgaard, N., Mezentsev, A., Bjørge-Engeland, I., Marisaldi, M., Lehtinen, N., et al. (2022). The temporal relationship between terrestrial gamma-ray flashes and associated optical pulses from lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD037128. <https://doi.org/10.1029/2022JD037128>

[4] Armando di Matteo, Luis Anchordoqui, Teresa Bister, et al., UHECR arrival directions in the latest data from the original Auger and TA surface detectors and nearby galaxies, *ICRC 2021, PoS ICRC2021 (2021) 308*, DOI: 10.22323/1.395.0308

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации. Количество опубликованных работ в международных журналах отражает основные результаты диссертации.

Указанные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальностям 1.3.1. Физика космоса, астрономия и 1.6.18. Науки об атмосфере и климате (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель **Климов Павел Александрович** заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 1.3.1. Физика космоса, астрономия и 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Официальный оппонент:

Профессор, доктор физико-математических наук

Руководитель отделения физики космических лучей Национальной  
лаборатории им. А.И.Алиханяна

Чилингарян Ашот Агасиевич

29 декабря 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +37491019405, e-mail: chili@aragats.am

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация:

01.04.16. Физика атомного ядра и элементарных частиц

Адрес места работы:

0036, ул. Братьев Алиханян 2, Ереван, Армения

Тел.: +37410352041, e-mail: chili@aragats.am

Подпись сотрудника Национальной лаборатории им. А.И.Алиханяна  
А.А.Чилингаряна удостоверяю:

Зав. Отделом Кадров Национальной Лаборатории им. А.И. Алиханяна

Е. Халинян

29 декабря 2023 г.