

**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**

**Актуальность избранной темы.** В атмосфере Земли важную роль играют различные электромагнитные и оптические явления, связанные как с внутренними атмосферными процессами, такими как токи глобальной электрической цепи и грозовая активность, так и с воздействием на атмосферу космических факторов, включая влияние солнечной радиации, космических лучей и т.п. Три десятилетия назад были открыты так называемые транзиентные оптические явления (Transient luminous events), представляющие собой крупномасштабные электроразрядные и оптические вспышки в верхней атмосфере над грозовыми облаками. Вначале этих исследований российские разработки в этой области опаздывали из-за отсутствия низкоорбитальных спутников, имеющих научную аппаратуру, необходимую для изучения этих явлений. Начиная с 2005 г. после запуска серии университетских спутников «Татьяна», «Татьяна-2», «Вернов», «Ломоносов», спутника «Чибис-М» и других, появились собственные экспериментальные данные. В диссертации П.А. Климова решаются актуальные вопросы, направленные на развитие этих работ, а также на исследований пространственно-временной структуры свечения атмосферы Земли в ультрафиолетовом диапазоне и разработку новой аппаратуры.

В последнее время были получены важные результаты в изучении космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) с помощью измерений широких атмосферных ливней (ШАЛ). Одним из сдерживающих факторов для этих измерений является ограничение поля зрения наземных установок по регистрации ШАЛ. Рядом исследователей было предложено

осуществлять измерения флуоресценции ШАЛ с орбиты Земли. Эта идея представляется весьма перспективной, поскольку регистрация ШАЛ с орбиты Земли позволяет проводить измерения по всей небесной сфере с помощью одного прибора. Одна из глав диссертации П.А. Климова посвящена практической реализации этого актуального вопроса.

В диссертации рассмотрен также ряд других задач по исследованию свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне, идентификации и изучению природы различных источников УФ квазистационарного и переменного излучений, исследованию причин некоторых авроральных явлений, таких как пульсирующие полярные сияния (ППС) и т.д. Все эти задачи требуют создания широкоапертурных приборов с высоким временным разрешением, пригодных для использования на борту космических аппаратов, а также разработки соответствующих методик измерений в УФ-диапазоне. Данные вопросы решаются в диссертации П.А. Климова, что делает её весьма актуальной.

**Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

На защиту вынесено 8 положений, отражающих главные цели и задачи исследования, направленные на экспериментальное исследование пространственно-временной структуры свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне на пространственных масштабах от 1 км до глобального распределения по Земному шару и временных масштабах от 1 мкс до нескольких минут.

Для решения этих задач была разработана необходимая методика измерений, создана и использована высокочувствительная, широкоугольная аппаратура высокого временного разрешения, которая позволила провести орбитальные космические эксперименты по изучению пространственно-временных структур атмосферного свечения в ближнем УФ-диапазоне.

В диссертации проведен анализ данных первого орбитального детектора КЛ ПВЭ ТУС, который показал принципиальную

работоспособность орбитальной методики регистрации событий по флуоресцентному излучению ШАЛ с околоземной орбиты.

Обоснование выносимых на защиту положений и выводов, связанных с изучением транзиентных атмосферных явлений в ближнем УФ-диапазоне, опирается также на экспериментальные данные, полученные независимо на нескольких спутниках: Татьяна-1, Татьяна-2, Вернов, Ломоносов и другие. Эти данные были проанализированы, что позволило классифицировать источники квазистационарного и транзиентного УФ-излучения атмосферы по их типу и физической природе. Продемонстрированы случаи, когда транзиентные световые явления типа ELVES образуются при максимальном токе обратного удара родительской молнии менее 30 кА.

Для обоснования выводов и положений, относящихся к слабым УФ-пульсациям в авроральной и субавроральной зонах, был проведен анализ ближнего УФ-свечения в этих зонах совместно с данными спутниковых экспериментов по регистрации потоков заряженных частиц. Для стереометрических наблюдений пространственно-временной структуры ППС разработана система наземных широкоугольных фотометров, с помощью которой была измерена интенсивность излучения двух спектральных линий молекулярного азота (337 нм и 391 нм) во время ППС.

Всё это является достаточным обоснованием положений, выдвинутых на защиту, выводов и рекомендаций, направленных на реализацию программы дальнейших исследований в этой области науки.

### **Достоверность научных результатов**

Степень достоверности полученных результатов подтверждается достаточно строгим анализом приборных погрешностей, применением современных методов выделения сигналов на фоне помех, сравнением экспериментальных данных, полученных автором на разных спутниках, и сравнением этих данных с результатами измерений, опубликованными другими исследователями.

## **Новизна научных результатов**

Новыми результатами являются разработанный метод исследования пространственно-временной структуры свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне и создание широкоапертурных приборов с высоким временным разрешением порядка 1 мкс, которые были успешно апробированы на борту космических аппаратов. В том числе впервые разработан, испытан и запущен на орбиту высокочувствительный УФ-детектор (телескоп) ТУС, который может быть использован для исследования УФ излучений в атмосфере, включая измерение флуоресцентного излучения ШАЛ на околоземной орбите.

Получены новые данные о пространственно-временной структуре УФ излучения атмосферы Земли, в том числе получено географическое распределение транзиентных атмосферных явлений в УФ-диапазоне. Впервые обнаружены транзиентные события в УФ-диапазоне, не связанные с грозовой активностью. На спутнике Ломоносов впервые проведены одновременные наблюдения потоков энергичных электронов и ППС в ближнем УФ-диапазоне.

Оценивая работу в целом, отметим ряд новых интересных результатов. В частности, обнаружены вспышки УФ излучения в земной атмосфере вдали от грозовых районов и молниевой активности, которые можно считать новым типом УФ-транзиентов в атмосфере. Установлено, что эти УФ вспышки имеют относительно равномерное географическое распределение, а их относительная доля может достигать порядка 10–20 % от регистрируемых УФ-вспышек. Есть несколько гипотез, объясняющих такие УФ-транзиенты, но их физический механизм пока не ясен.

Интересным результатом является исследование с борта спутников УФ-вспышек, обусловленных световыми явлениями типа ELVES, которое показало, что ELVES могут возникать при максимальном токе обратного удара родительской молнии менее 30 кА. Хотя ранее предполагалось, что такие явления характерны только для мощных разрядов молний.

Происхождение внегрозовых УФ транзиентов, а также ELVES малой мощности, зарегистрированных над океаном, представляет особый интерес.

В заключение работы хорошо описаны дальнейшие планы и перспективы работ по бортовой реализации проекта «КЛПВЭ», который позволит на хорошем статистическом уровне проводить регистрацию ШАЛ КЛ ПВЭ, а также планы по измерениям ППС в проекте RAIPS с помощью телескопов, установленных на Кольском полуострове, и другие проекты.

В целом диссертация написана на высоком профессиональном уровне, в ней содержится много новых интересных результатов как в области разработки новой аппаратуры, так и в научном исследовании УФ свечения атмосферы.

### **Замечания**

Первое замечание заключается в том, что некоторые экспериментальные результаты пока базируются на малом количестве измерений. Это замечание относится к проверке работоспособности принципа регистрации ШАЛ от КЛ ПВЭ по их флуоресцентному и черенковскому свечениям, измеряемым детектором ТУС на орбите в ночной атмосфере Земли, и к анализу событий ППС, зарегистрированных детекторами ТУС и ДЭПРОН для проверки гипотезы о связи УФ-пульсаций с потоками высокоэнергичных электронов.

Второе небольшое замечание - маловато простых теоретических оценок (таких, например, как на стр.129), относящихся не к оценке чувствительностей и других характеристик приборов, а к физической интерпретации наблюдений.

Отметим также наличие в тексте работы мелких неточностей и ошибок. Например, в формулах (1.2) и (1.7) использованы разные обозначения для элементарного заряда. В формуле (3.2) написан косинус от арккосинуса без элементарного упрощения. На рис. 4.8 (стр. 163) ошибочно изображено тоже самое, что на рис. 4.7. Не везде указаны формулы, по которым производились

расчёты, не указаны все приближения и ограничения (стр. 41, 93 и 141). Не везде расшифрована аббревиатура.

Вместе с тем, указанные 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 специальности по специальностям 1.3.1. Физика космоса, астрономия и 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник лаборатории теории электромагнитных полей  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт  
земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.  
Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Сурков Вадим Вадимович

20.12.2023

Контактные данные:

тел.: , e-mail: vsurkov@izmiran.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация: 04.00.02 – геофизика

Адрес места работы:

108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение науки Институт земного  
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
Российской академии наук (ИЗМИРАН).

Тел.: 8-495-851-01-20; e-mail: vsurkov@izmiran.ru

Подпись сотрудника ИЗМИРАН Суркова В.В. удостоверяю:

Учёный секретарь ИЗМИРАН

А.И. Рез

20.12.2023