

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Гресья Олега Анатольевича
на тему: «Многоканальные исследования астрофизических источников
высоких энергий во Вселенной»
по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия»

На протяжении длительного времени в ГАИШ МГУ успешно функционирует созданная в 2002 г. профессором физического факультета МГУ В.М. Липуновым и доцентом физического факультета МГУ В.Г. Корниловым уникальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР, предназначенная для поиска и раннего исследования оптических транзиентов. В настоящее время она включает 8 спаренных 40-см автоматических широкоугольных телескопов и камеры широкого поля, установленные в России, Испании, ЮАР, Аргентине и Мексике в большом диапазоне географических долгот, что позволяет практически круглосуточно проводить оптические наблюдения явлений, сопровождающих процессы с высокой энергетикой. За годы активных алертных наблюдений благодаря быстрому наведению и отождествлению возможных источников сеть МАСТЕР обнаружила более 3500 транзиентов разной природы, что сделало команду МАСТЕРА мировым лидером подобных исследований.

В последние годы всё чаще об астрофизике говорят не только как о всеволновой науке, изучающей космические объекты во всём диапазоне частот электромагнитного спектра, но и как о многоканальной науке, использующей новые каналы для изучения Вселенной, такие как космические лучи, нейтрино и гравитационные волны. В понимании природы космических лучей и нейтрино высоких энергий остаётся ещё много неясностей, но не исключено, что они также могут быть генетически связаны с явлениями, изучаемыми сетью МАСТЕР (взрывами Сверхновых, слияниями компактных объектов, процессами вблизи сверхмассивных

чёрных дыр в ядрах галактик и пр.). Совершенно очевидно, что комплексный многоканальный подход к анализу результатов наблюдения оптических транзиентов, нейтринных и гравитационно-волновых событий может дать ответы на многие пока не решённые вопросы в астрофизике высоких энергий. Эти обстоятельства определяют безусловную **актуальность и своевременность** выбранного диссертантом направления исследований. Рецензируемая диссертация, по моему впечатлению, является одной из первых защищаемых работ в новом направлении многоканальных исследований астрофизических явлений и процессов, сопровождающихся высоким энерговыделением.

Диссертационная работа Олега Анатольевича Греся «Многоканальные исследования астрофизических источников высоких энергий во Вселенной» посвящена поиску возможных связей ряда нейтринных и гравитационных событий с алертными оптическими транзиентами, а также исследованию энергетического спектра космических лучей. Эти работы проведены при самом непосредственном многолетнем участии соискателя на всех этапах. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение и список литературы. Её объём – 120 страниц текста.

Во Введении даётся общая характеристика работы, обосновывается её актуальность, научная и практическая значимость, кратко перечислены основные результаты работы и выносимые на защиту положения, указан личный вклад автора и перечислены публикации по теме диссертации.

В первой главе – «Оперативная оптическая инспекция уникального нейтринного мультиплета IC160217, выполненная на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР» – даются результаты поиска возможного оптического компонента уникального триплета нейтрино IC160217, зарегистрированного нейтринной обсерваторией IceCube 16.02.2016 г., на телескопах сети МАСТЕР (в диссертации отмечено, что за 6 лет IceCube зарегистрировала около 100 одиночных нейтринных событий). Поле нейтринных событий IC160217 детально изучалось автором по

оригинальным наблюдениям МАСТЕРа в оптике на протяжении 60 суток после триггера и по архивным снимкам, сделанным за 30 суток до триггера, а также по данным рентгеновских и гамма-обсерваторий Swift, Fermi и оптических наблюдений ASAS-SN и LCO. Несмотря на большое число оптических, рентгеновских и гамма-транзиентов, найденных ранее и позднее в области триггера IC160217, переменного оптического источника, достоверно связанного с нейтринным триплетом, не обнаружено. Материал первой главы достаточно подробно описывает применяемый командой МАСТЕРа подход к поиску оптических компонентов триггеров.

Во второй главе – «Исследование событий, зарегистрированных нейтринным детектором ANTARES, на Глобальной сети МАСТЕР» – описана работа диссертанта по поиску оптических транзиентов, сопровождающих нейтринные триггеры астрофизического происхождения, регистрируемые нейтринной обсерваторией ANTARES. Диссертант приводит общие данные о 179 нейтринных событиях, изученных на телескопах МАСТЕР. Важно отметить, что примерно в 30% случаев телескопы сети МАСТЕР наводились на область триггера по нейтринным алертам менее чем за 1 минуту. В полях ошибок оказалось 359 объектов, среди которых АГЯ, рентгеновские источники ROSAT, Swift и гамма-источники Fermi, а также множество катаклизмических переменных. В качестве наиболее вероятных источников нейтрино высоких энергий после комплексного анализа данных выделено 20 блазаров (объектов типа BL Lac) в полях радиусом менее 0.7° . Один триггер уверенно отождествлен с радиогалактикой Cen A, в пределах 8° от которой зарегистрированы ещё 4 нейтринных события. Хочется отметить, что для поиска переменных в оптике источников диссертант использовал результаты миссии GAIA. Приведены таблицы отождествления событий с блазарами и квазарами (в ряде случаев обладающими большими красными смещениями). В трёх случаях заподозрена возможная связь нейтринного события с падением блеска блазара. Для оперативного быстрого отождествления возможных источников нейтрино при участии диссертанта

создана периодически обновляемая база данных по ранее найденным объектам из разных каталогов, потенциально связанным с нейтринными событиями. Приведены данные о конкретных каталожных объектах, попадающих в поля ошибок ряда нейтринных событий сверхвысоких энергий.

Глава 3 – «Энергетический спектр первичных космических лучей по данным Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE» – полностью соответствует тематике диссертации и прекрасно иллюстрирует современный многоканальный подход к исследованию астрофизических процессов с высокой энергией. Описаны наблюдательные средства функционирующих в Прибайкалье черенковских гамма-телескопов Tunka-25, Tunka-133, TAIGA-HiSCORE, предназначенных для исследования свойств космических лучей высокой энергии (10^{14} – 10^{18} эВ), связанных с астрофизическими источниками. Диссертант на протяжении многих лет принимал самое непосредственное участие на всех этапах этих работ, проводимых совместно НИИЯФ МГУ и НИИПФ ИГУ. Весьма подробно описаны технические характеристики аппаратуры. Представлены результаты уточнения энергетического спектра первичных космических лучей по наблюдениям около 375 тыс. событий, в том числе около 4200 с энергией более 10^{17} эВ. Сделан уверенный вывод о резком изменении наклона степенного спектра вблизи энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ, подтверждённый и другими исследованиями. Замечено, что этот излом может быть связан как с особенностями механизма генерации космических лучей, так и с процессами их распространения в Галактике.

Глава 4 – «Обнаружение и исследование оптических транзиентов на телескопах-роботах МАСТЕР при инспекции гравитационно-волновых алертов aLIGO, LIGO/Virgo и гамма-всплесков» – посвящена роли сети МАСТЕР в сопровождении гравитационно-волновых наблюдений слияний нейтронных звёзд и чёрных дыр. В ней описана стратегия наблюдений, факторы, обеспечивающие эффективность работы сети МАСТЕР, и полученные выдающиеся результаты, в т.ч. обнаружение Килоновой

GW170817, продукта слияния нейтронных звёзд. В этих работах диссертант обеспечивал проведение наблюдений на телескопах МАСТЕР-Тунка, МАСТЕР-SAAO и МАСТЕР-IAC. В качестве примеров приведены характеристики полей ошибок гравитационно-волновых событий GW170502, GW170227, GW151226, GW170225, GW150914. Подробно рассказывается о синхронных наблюдениях на телескопах МАСТЕР и перечислены обнаруженные оптические источники (Сверхновые, карликовые Новые и др. объекты). Описаны также наблюдения в некоторых полях ошибок гамма-транзиентов. **В Заключении** приведена краткая сводка результатов, включённых в диссертацию. Список литературы содержит 193 ссылки, в т.ч. на ряд электронных ресурсов.

Характеризуя работу в целом, я должен констатировать, что рассматриваемая диссертация О.А. Греся представляет собой законченное исследование в рамках важного и ныне ставшего очень актуальным направления – многоканального изучения высокоэнергетических астрофизических процессов. Автор убедительно продемонстрировал эффективность подхода, объединяющего алертные нейтринные, гравитационно-волновые и оптические наблюдения транзиентов, позволяющие глубже понять природу наблюдаемых астрофизических процессов. В рамках многоканального подхода с помощью сети оптических телескопов МАСТЕР он исследовал поля ошибок нейтринных событий, зарегистрированных обсерваториями IceCube и ANTARES, а также гравитационно-волновых событий, вызванных слияниями нейтронных звёзд и чёрных дыр. В итоге был найден ряд кандидатов в оптические компоненты событий. Впервые удалось обнаружить излом энергетического спектра первичных космических лучей на энергиях около $2 \cdot 10^{16}$ эВ. Эти результаты *хорошо обоснованы* и, безусловно, *являются оригинальными и новыми*.

Следует отметить, что автору диссертации О.А. Гресю принадлежит немалый многолетний вклад как в создание, техническое обеспечение и длительную эксплуатацию наблюдательной аппаратуры, так и в процесс

наблюдений, обработку и интерпретацию их результатов. Диссертант с 2015 г. активно участвовал в обеспечении алертных наблюдений нейтринных событий сетью МАСТЕР и в большой команде исследователей космических лучей. Олег Анатольевич Гресь продемонстрировал прекрасное владение методиками многоканальных исследований и хорошее знание теоретических основ изучаемых явлений в астрофизике высоких энергий. Использование оптических телескопов сети МАСТЕР, многие характеристики которых уникальны, описаны в специальной литературе и хорошо известны, оригинального математического обеспечения, применяемого для оперативной обработки фреймов, адекватных математических и статистических методов анализа обеспечивает *достоверность выносимых на защиту результатов*, опубликованных в ведущих рецензируемых журналах. Диссертация О.А. Гресь, в которой затронуты наблюдения астрофизических нейтрино, гравитационных волн, космических лучей и оптических транзиентов, читается с большим интересом. Её содержание адекватно отражено в автореферате. Помимо пяти статей, опубликованных в рецензируемых журналах, и статей в трудах конференций, на основе которых выполнена диссертация, О.А. Гресь является соавтором и других известных публикаций об открытиях, сделанных командой МАСТЕРа, в том числе в журнале Nature. Отмечу прекрасные библиометрические показатели работы диссертанта (более 6000 ссылок и высокий индекс Хирша – 27), характеризующие его высокую научную активность в составе больших коллективах исследователей.

Выскажу ряд замечаний, в основном имеющих редакционный характер. На стр. 8 в разделе «Актуальность темы и степень её разработанности» дважды почти дословно повторяется фраза: «С 2015 г. Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ вместе с соискателем активно участвует в программе...» и далее перечисляются проекты. На стр. 41 опечатка в дате («... нейтринных алертов с ANTARES с февраля 2015 г. по январь 2000 г.»); по-видимому, последняя дата относится к 2022 г.? В подписи к рис. 2.9

(стр. 59) стоит не очень понятная фраза: «Внутренний и внешний зеленые круги – 1σ и 3σ (по уровню 50%) поля ошибок вероятности содержания источника события» (ведь принято считать, что уровень 1σ соответствует вероятности около 68%, а 3σ – вероятности около 99.5%). На стр. 84 указано, что при наблюдениях события GW151226 рядом с найденным системой МАСТЕР оптическим источником «в радиусе 5 секунд в базе данных VIZIER» нет известных источников. Должен уточнить, что VizieR – это не база данных, а служба каталогов Страсбургского ЦАД, и если дана ссылка на службу каталогов VizieR, то надо было бы указать конкретные каталоги, в которых велся поиск объектов. В тексте довольно много опечаток, встречаются фразы с несогласованием падежей.

Разумеется, указанные замечания никоим образом не умаляют значимости диссертационного исследования, проведённого О.А. Гресем. Диссертация отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. «Физика космоса, астрономия» (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 приложениям № 5-6 «Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова».

Таким образом, я должен сказать, что соискатель Гресь Олег Анатольевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Физический факультет, заведующий кафедрой экспериментальной астрономии;

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, заведующий отделом изучения Галактики и переменных звёзд

Расторгуев Алексей Сергеевич

Подпись Расторгуева А.С. удостоверяю:

Начальник канцелярии ГАИШ МГУ

Новикова Л.Н.

Контактные данные: тел.: 7(495)9391616, e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Адрес места работы: 119234, Москва, Университетский пр-т, д. 13,
Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова

Тел.: +7(495)9392046; e-mail: director@sai.msu.ru

30 сентября 2022 г.