

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию А. А. Шейфлера «Оптический модуль Байкальского глубоководного нейтринного телескопа ВАИКАЛ-GVD (разработка и испытания регистрирующей системы)», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация А. А. Шейфлера «Оптический модуль Байкальского глубоководного нейтринного телескопа ВАИКАЛ-GVD (разработка и испытания регистрирующей системы)» посвящена актуальному вопросу астрофизики и космологии, связанному с физикой элементарных частиц, обладающих энергией, недоступной современным ускорителям. Особое место в этих исследованиях занимает поиск астрофизических источников нейтрино высокой энергии, изучение связи физики нейтрино с физикой темной материи. В последние годы исследование физики нейтрино проводится с помощью экспериментальных установок промышленного масштаба и развитие методов экспериментальной физики и создание новых приборов имеет первостепенное значение для успеха фундаментальных физических исследований. В настоящее время в озере Байкал на базе установки НТ-200 создается глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD (НТ1000) с масштабом размера порядка кубического километра. В разработку и создание этого нового нейтринного телескопа внес значительный вклад автор настоящей диссертации. Положительной особенностью работы автора является обладание широким знанием экспериментальных методов и разносторонними навыками экспериментальной работы в области физики элементарных частиц, что позволило ему выполнить обширный объем работы за сравнительно короткий срок: от создания первых образцов оптического глубоководного оптического модуля (ОМ) в 2013 г., до гирлянды модулей (2014 г.) и кластера из нескольких гирлянд, начавших работать в 2015 г. Главной задачей автора была разработка надежного ОМ с электроникой контроля и управления его работой, обеспечивающей передачу данных в береговой центр телескопа. Автор не только осуществил разработку ОМ, но и обеспечил массовое изготовление модулей обладающих высокой надежностью работы глубоко в воде Байкала. В 2016 г. первая часть установки ВАИКАЛ-GVD, содержащая около 300 ОМ, начала работать и дала первые результаты об атмосферных нейтрино и мюонах. Методика и программное обеспечение, созданное для автоматизированной калибровки, проверки и паспортизации оптических модулей зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка иллюстративного материала и таблиц, списка литературы.

Содержание диссертации изложено в 6 главах в соответствии с последовательностью работы автора по созданию глубоководного нейтринного телескопа BAIKAL-GVD.

В первой и второй главах рассмотрен оптический детектор новой установки в сравнении с оптическими характеристиками предыдущих установок: NEBOD, AMANDA, IceCube, ANTARES, NESTOR, NEMO, NT-200, KM3Net и показано его преимущество для работы в глубоководных условиях озера Байкал. Здесь же изложена общая схема работы нейтринного телескопа с оптическими модулями на глубине около 1300 м в озере Байкал и ее центром на берегу озера на расстоянии порядка 4 км от ее глубоководной части.

В третьей главе описывается конструкция оптического модуля, принцип его работы, приводятся характеристики его основных компонентов. В этой главе детально описаны все стороны работы оптического модуля, способы контроля его работы, приводятся полученные в результате проведенной работы характеристики модуля.

В четвертой главе приводится описание автоматизированного стенда для исследований оптического модуля и их паспортизации, представлены методика измерения параметров оптических модулей и статистический анализ полученных результатов.

В пятой главе описан процесс массового использования оптических модулей при создании полномасштабной установки BAIKAL-GVD, обеспечивающий требуемый уровень их надежности.

В шестой главе представлены выборочные результаты натурных испытаний оптических модулей в озере Байкал, а также результаты их работы в составе первого кластера BAIKAL-GVD, который был введен в эксплуатацию в 2015 г.

В диссертационной работе А. А. Шейфлера показано, что:

- На базе ФЭУ R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью фотокатода (~ 35 %) создан ключевой элемент системы регистрации нейтринного телескопа BAIKAL-GVD: глубоководный оптический модуль (ОМ). Характеристики ОМ удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к фотодетекторам крупномасштабных нейтринных телескопов.
- Конструкция оптического модуля разработана с учетом особых требований к надежности и эргономике ОМ.

- ОМ является функционально законченным прибором, оснащенным системой контроля его параметров, системой управления режимом его работы, системой калибровки его параметров, аппаратурой для мониторинга условий эксплуатации ОМ.
- Разработана методика и создано программное и аппаратное обеспечение для проверки, калибровки и паспортизации оптических модулей БАЙКАЛ-GVD. На стенд для исследования параметров сигналов светодиодов ОМ получен патент.
- ОМ был детально изучен и охарактеризован. Проведены лабораторные испытания и паспортизация более 300 ОМ, создан архив данных параметров ОМ. К ним относятся: темновая скорость счета сигналов, форма импульсов в одно-фотоэлектронном и много-фотоэлектронном режимах работы, временное разрешение отклика на «большие» световые импульсы (работа в режиме «насыщения»), параметры послеимпульсов, угловой зависимости отклика ОМ.
- Налажена процедура подготовки ОМ в условиях массового производства. Подготовка ОМ включает в себя тестирование и паспортизацию отдельных компонентов ОМ (усилителя, делителя напряжений на ФЭУ, контроллера ОМ, светодиодных калибровочных источников), результаты температурных испытаний блока электроники ОМ и набор проверочных процедур, позволяющих контролировать работоспособность ОМ на разных этапах его подготовки (после сборки, герметизации, транспортировки и монтажа на установке).
- Подготовлены оптические модули для первого кластера БАЙКАЛ-GVD.
- Проведены долговременные натурные испытания надежности оптических модулей. Анализ работоспособности ОМ показал высокий уровень их надежности: в течение одного года эксплуатации количество вышедших из строя ОМ менее 1 %.
- Более чем годовая эксплуатация оптических модулей в составе первого кластера БАЙКАЛ-GVD показала эффективность их работы в режиме регистрации мюонов и каскадных ливней, показала надежность работы калибровочной системы ОМ.

К недостатку работы следует отнести недостаточное внимание связи между параметрами созданного оптического модуля, геометрией размещения модулей в воде озера Байкал, другими параметрами установки БАЙКАЛ-GVD и задачами физики нейтрино. Несмотря на то, что главное содержание диссертации справедливо отнесено к прибору и методу измерения физических параметров, являющихся предметом диссертации, следовало бы уделить определенное внимание связи между физико-техническими параметрами

установки и параметрами объекта исследования. Единственное место в диссертации, в котором обсуждается связь между измеренными параметрами и известными из предыдущих экспериментов результатами, является сравнение на стр. 144 экспериментального и рассчитанного распределения по «межканальным задержкам». Это сравнение указывает на согласие данных установки BAIKAL-GVD с известными параметрами потока атмосферных мюонов, регистрируемого на километровых глубинах оз. Байкал. Результаты работы по разработке и созданию установки BAIKAL-GVD выиграли бы, если бы ее преимущества среди других нейтринных телескопов были показаны на уровне ожидаемых преимуществ в решении физической задачи (нейтринная экспозиция для источников в разных областях небесной сферы для известного энергетического порога).

Отмеченный недостаток не снижает общую оценку проделанной автором работы. Изложенные в диссертации результаты позволяют развивать важнейшее для астрофизики и физики элементарных частиц направление экспериментального исследования нейтрино высоких энергий.

Диссертация А. А. Шейфлера полностью соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, а сам А. А. Шейфлер заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

18 ноября 2016 г.

Доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Отдела космических наук НИИЯФ МГУ  
адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2  
адрес эл. почты: bkhrenov@yandex.ru  
тел.: (495) 939-57-34

Б. А. Хренов

Подпись Бориса Аркадьевича Хренова заверяю  
Директор НИИЯФ МГУ  
доктор физико-математических наук, профессор

М. И. Панасюк

Хренов Борис Аркадьевич  
доктор физ-мат наук, ст. научный сотрудник.

Физика высоких энергий 01-04-23

Основные публикации по теме защиты:

Ground-based complex for checking the optical system / V. Grebenyuk, V. Boreiko, A. Dmitrota, ... B. A. Khrenov et al. // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2016. — Vol. 13, no. 5. — P. 579–582.

1. Ultra high energy photons and neutrinos with JEM-EUSO / G. Garipov, B. A. Khrenov, P. A. Klimov et al. // *Experimental Astronomy*. — 2015. — Vol. 40, no. 1. — P. 215–233.
2. Calibration aspects of the JEM-EUSO mission / G. Garipov, B. A. Khrenov, P. A. Klimov et al. // *Experimental Astronomy*. — 2015. — Vol. 40, no. 1. — P. 91–116.
3. Space Experiments aboard the Lomonosov MSU Satellite / V. A. Sadovnichiy, A. M. Amelyushkin, V. Angelopoulos, ... B. A. Khrenov et al. // *Cosmic Research (English translation of Kosimicheskie Issledovaniya)*. — 2014. — Vol. 52. — P. 250–250.
4. Global transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of Universitetsky-Tatiana-2 satellite / G. K. Garipov, B. A. Khrenov, P. A. Klimov et al. // *Journal of Geophysical Research*. — 2013. — Vol. 118, no. 2. — P. 370–379. doi:10.1029/2012JD017501
5. An evaluation of the exposure in nadir observation of the JEM-EUSO mission / J. H. Adams, G. K. Garipov, B. A. Khrenov et al. // *Astroparticle Physics*. — 2013. — Vol. 44. — P. 76–90.
6. Space experiments on-board of Lomonosov mission to study gamma-ray bursts and UHECRS / A. M. Amelushkin, V. V. Bogomolov, V. V. Benghin, ... B. A. Khrenov et al. // *Gamma-ray Bursts: 15 Years of GRB Afterglows – Progenitors, Environments and Host Galaxies from the Nearby to the Early Universe*. — Vol. 61 of EAS Publications Series. — 2013. — P. 545–552.
7. Pioneering space based detector for study of cosmic rays beyond GZK Limit / B. A. Khrenov, M. I. Panasyuk, G. K. Garipov et al. // *European J Phys*. — 2013. — Vol. 53. DOI:10.1051/epjconf/20135309006.