

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.119.01  
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от **15.02.2018 г. № 1/38**

О присуждении Айнутдинову Владимиру Маратовичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация “Кластер Baikal-GVD – основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа” по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 19.10.2017 г., протокол № 8/35 диссертационным советом Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г.Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства образования и науки России № 75/нк от 15 февраля 2013 года.

Соискатель Айнутдинов Владимир Маратович, 1960 года рождения, в 1983 году окончил Московский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-физический институт по специальности “Экспериментальная ядерная физика”. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук “Черенковский водный детектор на поверхности Земли” защитил в 1997 году по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики» в диссертационном совете, созданном на базе Московского государственного инженерно-физического института (технического университета). Был выдан диплом кандидата наук КТ № 031179, дата выдачи 16 декабря 1996 г. Работает в должности старшего научного сотрудника в Лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий (НАВЭ) Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Институте ядерных исследований Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук, Лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий (НАВЭ).

Официальные оппоненты:

1. **Денисов Сергей Петрович**, доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения “Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”;

2. **Ольшевский Александр Григорьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, начальник Научно-экспериментального отдела физики элементарных частиц Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований;

3. **Хренов Борис Аркадьевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, отдела космических наук, лаборатории частиц сверхвысоких энергий;

- дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном С.Б. Шауловым (доктор физ.-мат. наук, профессор, Ведущий научный сотрудник Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН), О.Д. Далькаровым (доктор физ.-мат. наук, профессор, Председатель Ученого совета Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН), Н.П.Топчиевым (кандидат физ.-мат. наук, секретарь Ученого совета Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН) указала, что диссертация В.М. Айнутдинова “Кластер Baikal-GVD – основная структурная единица Байкальского глубоководного

нейтринного телескопа” соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а сам Владимир Маратович Айнутдинов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Соискатель имеет 78 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 32 работы, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 23 работы. Работы соискателя, представленные в диссертации, посвящены научным исследованиям, выполненным с целью создания глубоководного нейтринного телескопа масштаба кубического километра на оз. Байкал: Baikal-GVD. В них представлены принципы построения и особенности архитектуры системы сбора данных нейтринного телескопа, результаты оптимизации его регистрирующей системы, описание измерительной и управляющей аппаратуры установки. В статьях отражены основные этапы разработки и создания Baikal-GVD: от исследований параметров регистрирующей аппаратуры (2006 – 2010 годы) до ввода в эксплуатацию первых кластеров установки (2015 – 2016 годы), представлены результаты долговременных испытаний нейтринного телескопа и первые результаты анализа зарегистрированных физических событий, указывающие на достаточно высокую эффективность работы нейтринного телескопа. Соискатель внес существенный вклад (в ряде работ – определяющий) в каждую из опубликованных работ.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. V.M. Aynutdinov, V.A. Balkanov, I.A. Belolaptikov et al. /The Baikal Neutrino Telescope // Physics of Atomic Nuclei. V.69, #11 (2006) p.1914-1921.

2. V. Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al /The BAIKAL neutrino experiment: from NT200 to NT200+ // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 567 (2006) p. 433-437.
3. В.М. Айнутдинов, В.А. Балканов, И.А. Белолаптиков и др. /Байкальский нейтринный телескоп: статус, результаты и перспективы развития // Известия РАН, Сер. Физ. Т. 71, № 4, (2007) с. 597-601.
4. V. Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino experiment: NT200+ and beyond // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 572 (2007) p. 511-514.
5. V. Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al. /The BAIKAL neutrino experiment: status, selected physics results, and perspectives // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 588 (2008) p. 99-106.
6. V. Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al. /The prototype string for the km<sup>3</sup>-scale Baikal neutrino telescope // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 602 (2009) p. 227-234.
7. A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov et al. /Baikal neutrino telescope - an underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 598 (2009) p. 282–288.
8. В.М. Айнутдинов, А.В. Аврорин и др. /Статус байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН, Сер. Физ. Т. 73. № 5 (2009) с. 682-684.
9. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, В.А. Балканов и др. /Байкальский нейтринный проект – история и перспективы // Известия высших учебных заведений. Физика. Т. 53 №6 (2010) с. 52-61.
10. A. Avrorin, V. Aynutdinov, I. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino experiment // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 626 (2011) p. 13-18.
11. A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov et al. /The Baikal Neutrino Project: Present and perspective // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 628 (2011) p.115-119.
12. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолаптиков и др. /Поиск нейтрино от гамма-всплесков на Байкальском нейтринном телескопе NT200 // Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. Т. 37 №10 (2011) с. 754-760.

13. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /The Baikal neutrino telescope - Results and plans // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 630 (2011) p. 115-118.
14. A. Avrorin, V. Aynutdinov, I. Belolaptikov et al. /The Gigaton volume detector in lake Baikal // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 639 (2011) p. 30-32.
15. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолаптиков и др. /Статус байкальского нейтринного эксперимента // Известия РАН, сер. Физ. Т. 75. № 3 (2011) с. 443-444.
16. А.В. Аврорин, В.М. Айнутдинов, И.А. Белолаптиков и др.  
/Экспериментальная гирлянда Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента, № 5 (2011) с. 55-65.
17. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 692 (2012) p. 46-52.
18. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Current status of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 725 (2013) p. 23-26.
19. A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, I.A. Belolaptikov et al. /Present status of the BAIKAL-GVD project development // Journal of Physics: Conference Series. V. 409 #1 (2013).
20. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The prototyping/early construction phase of the BAIKAL-GVD project // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. V. 742 (2014) p. 82-88.
21. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, Айнутдинов В.М. и др. /Система сбора данных Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 // Приборы и Техника Эксперимента. № 3 (2014) с. 28-39.
22. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, В.М. Айнутдинов и др. /Статус и последние результаты проекта Байкал-ГВД // Физика элементарных частиц и атомного ядра. Т. 46, Вып. 2 (2015) с 211-221.
23. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status of the Baikal-GVD Project // Proceedings 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics: Particle Physics at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo (2015) p.

99–101.

24. A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The optical module of Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 01003.
25. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Baikal-GVD results // EPJ Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 11005.
26. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status of the early construction phase of Baikal-GVD // Nuclear and Particle Physics Proceedings. V. 273 (2016) p. 314-320.
27. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The data acquisition system for Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 5004.
28. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V. M. Aynutdinov et al. /The optical detection unit for Baikal-GVD neutrino telescope // EPJ Web of Conferences. V. 121 (2016) p. 05008.
29. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /The optical module of Baikal-GVD // EPJ Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 1003.
30. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Status and perspectives of the BAIKAL-GVD project // EPJ Web of Conferences. V. 121 (2016) p. 5003.
31. А.В. Аврорин, А.Д. Аврорин, В.М. Айнутдинов и др. /Оптический модуль Глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. Т. 13 № 6 (2016) с. 756–766.
32. A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al. /Baikal-GVD: Results, status and plans // The European Phys. J. Web of Conferences. V. 116 (2016) p. 11005.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации. Во всех отзывах сделан вывод о том, что работа является актуальной, содержит хорошо обоснованные новые результаты и полностью отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Отмечается, что диссертация является завершённой научно-исследовательской работой, в которой содержится решение важной и актуальной научной задачи по созданию кластера детекторов для регистрации черенковского излучения, образованного при взаимодействии космических нейтрино высокой энергии с водной средой озера Байкал. Её результаты имеют ключевое значение не только для создания уникальной установки Baikal-GVD с полезным объёмом  $1 \text{ км}^3$ , но и для развития методики экспериментов как в области астрофизики, так и физики частиц, в том числе на современных ускорителях и коллайдерах. Указывается, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и ее результаты работы представляют собой существенный вклад в нейтринную астрофизику, открывают новые перспективы изучения свойств источников нейтрино, позволяют развивать важнейшее для астрофизики и физики элементарных частиц направление экспериментального исследования нейтрино высоких энергий.

В отзывах имеются замечания.

1. В работе не рассматривается вопрос о необходимости измерения формы импульсов и о том, какие преимущества дает эта дополнительная информация по сравнению с традиционным подходом: измерением только времени прихода и заряда регистрируемых сигналов.
2. В работе не представлены исследования влияния изменения температуры эксплуатации на параметры аппаратуры. Так же было бы полезно исследовать зависимость временных задержек глубоководных кабелей от давления.
3. В работе не приводится информация о доле фоновых событий в общем потоке данных, поступающих с детектора. Такая информация, в частности, позволила бы оценить один из ключевых параметров триггерной системы: отношение сигнал – фон.
4. При расчете фона для регистрации каскадных ливней, инициированных нейтрино, не учтен вклад мюонов прямой генерации, который может быть существенным в области энергий каскадов 100 и более ТэВ.
5. В диссертации указывается, что детектор на оз. Байкал ориентирован не только на решение физических задач, но и позволяет проводить исследования в

других областях науки и техники: гидрологии, гидроакустики, лимнологии. Однако методика и цели проведения подобных исследований в работе не обсуждаются.

6. Следовало бы подробнее описать, для чего планируется создать установку Baikal-GVD, т.е. программу физических исследований.

7. В работе не представлены данные по долговременной стабильности калибровочных коэффициентов измерительных каналов, которые, в частности, могли бы характеризовать один из ключевых параметров установки: стабильность характеристик фотокатодов и диодной системы используемых в проекте фотоэлектронных умножителей.

8. Использование оптических линий связи в установке ограничивается только сегментом, связывающим кластер с береговым центром сбора данных. Передача информации в пределах кластера осуществляется по электрическим кабелям, что ограничивает скорость передачи данных и может снижать надежность работы системы в целом. Причины, по которым не используются оптоволоконные линии, в работе подробно не обсуждаются.

9. Одним из принципиальных вопросов при проектировании установок такого масштаба с ограниченным доступом для ремонта и замены аппаратуры является вопрос надежности её отдельных узлов и их компонент. При этом обычно используются как теоретические методы оценки параметра «наработки на отказ», так и испытания в условиях ускоренного температурного «старения». Этому вопросу в диссертации уделяется недостаточное внимание.

10. В работе дается сравнительно скупое описание экспериментальных результатов на Кластере Baikal-GVD, уже проработавшем более года. Интерес представляют даже верхние пределы значения интенсивности астрофизических нейтрино от известных источников космических лучей. Экстраполяция полученной статистики событий, подкреплённая возможной интерпретацией эксперимента, дала бы убедительное подтверждение важности создания полномасштабной установки Baikal-GVD.



11. Было бы справедливо уделить внимание роли коллаборации других институтов РФ и зарубежных университетов, участвующих в коллаборации Baikal.

12. В представленной диссертационной работе в ряде случаев отсутствуют ссылки на описания и техническую документацию на приборы, используемые в системе сбора данных нейтринного телескопа (микросхемы, модемы и т. д.).

13. В работе встречаются опечатки. В частности, на рис. 3.2.5 (стр. 109) в подписи вертикальной оси вместо логарифмической шкалы указана линейная.

Во всех отзывах отмечается, что указанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организацией обосновывается их высокой научной квалификацией, полученными ими научными результатами мирового уровня и многолетним опытом научных исследований по сходной тематике.

Диссертационный совет отмечает, что совокупность полученных в диссертации результатов можно квалифицировать как крупное научное достижение в области экспериментальной физики. На основании выполненных соискателем исследований:

1. Разработана общая концепция нейтринного телескопа Baikal-GVD, оптимизированная для условий развертывания детектора со льда оз. Байкал, обеспечивающая простоту его наращиваемости и возможность адаптации для решения различных физических задач. Поэтапное развёртывание детектора в виде отдельных кластеров позволило проводить физические исследования уже на ранних стадиях создания установки.
2. Разработана архитектура системы сбора данных телескопа, обеспечивающая совместное эффективное функционирование ее основных элементов: триггерной системы, систем калибровки и мониторинга, электронных модулей обработки данных и передачи информации.
3. Разработан, создан и исследован в условиях долговременной работы в оз. Байкал комплекс физической аппаратуры, включающий в свой состав глубоководные модули и межмодульные коммуникации, обеспечивающие

регистрацию сигналов, выработку триггера, формирование временных кадров событий, предварительную обработку и передачу информации в Береговой центр сбора данных, калибровку каналов установки, управление электропитанием всех узлов детектора.

4. Разработан и исследован ключевой элемент системы регистрации нейтринного телескопа Baikal-GVD – глубоководный оптический модуль (ОМ), в котором применен новый ФЭУ R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью фотокатода (~ 35 %). Характеристики ОМ удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к фотодетекторам крупномасштабных нейтринных телескопов: чувствительность к световому потоку на уровне единичных фотонов, динамический диапазон до  $\sim 10^4$  ф.э, временное разрешение на уровне единиц наносекунд, что соответствует угловому разрешению телескопа  $\sim 0,5^\circ$ .
5. Разработана методика, создано программное и аппаратное обеспечение и налажена процедура подготовки ОМ в условиях их массового производства. Проведены лабораторные испытания и паспортизация более 600 оптических модулей, которые в настоящее время входят в состав первых двух кластеров Baikal-GVD.
6. Разработана и проверена новая экспериментальная методика калибровки измерительных систем телескопа, основанная на использовании светодиодных, лазерных и акустических источников сигналов. Точность временной калибровки каналов детектора составила 2 нс, точность восстановления координат каскадных ливней 2 - 3 м.
7. Доказана работоспособность и устойчивость работы системы регистрации и сбора данных установки в режимах калибровки и регистрации мюонов и каскадных ливней. Общий объем набранной статистики в 2016 году превысил  $1,5 \times 10^9$  событий при живом времени экспозиции 235 дней.
8. Доказана возможность длительной эксплуатации аппаратуры нейтринного телескопа: на основании многолетних натуральных испытаний получено, что вероятность выхода из строя аппаратуры оптических модулей нейтринного

телескопа составила  $\sim 10^{-2} \frac{\text{отказов}}{\text{год}}$ . Экспериментальная оценка надежности согласуется с расчетом.

9. Доказана возможность развертывания первой очереди установки GVD-1 с эффективным объемом  $0,5 \text{ км}^3$  в течение 3 - 4 лет.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. Результаты разработки глубоководного оптического модуля применены при создании системы регистрации Baikal-GVD, в настоящее время в составе нейтринного телескопа успешно и эффективно функционирует около 600 оптических модулей.
2. Новый подход к организации системы сбора данных в глубоководном исполнении, основанный на применении локальных сетей с использованием удлинителей Ethernet в сочетании с разработанной методикой фильтрации данных в режиме реального времени успешно применен при создании нейтринного телескопа.
3. Созданы и введены в эксплуатацию два кластера Baikal-GVD с суммарным эффективным объемом  $0,1 \text{ км}^3$ , что открывает новые возможности для проведения исследований в области физики космических лучей и нейтринной астрофизики. Впервые в Северном полушарии создана установка, позволяющая регистрировать нейтрино высоких энергий от астрофизических источников. По мере своего развития установка позволит превзойти IceCube по важнейшей характеристике – угловому разрешению, что открывает реальные возможности по развитию нового научного направления “нейтринная астрономия”. Ввод в эксплуатацию первых кластеров Baikal-GVD является определяющим шагом на пути к созданию детектора нового поколения: нейтринного телескопа на оз. Байкал масштаба кубического километра.

Оценка достоверности результатов выявила:

1. Исследования корректности и надежности работы регистрирующей системы нейтринного телескопа выполнены на основе многолетних натуральных испытаний в оз. Байкал, что обеспечивает высокий уровень статистической обеспеченности экспериментальной информации, использованной для анализа.
2. Обоснованность калибровочных процедур измерительных каналов подтверждается согласием величин калибровочных коэффициентов, полученных различными независимыми методами.
3. Идея и общая концепция архитектуры системы сбора данных установки Baikal-GVD основана на анализе практики и обобщении передового опыта создания глубоководных нейтринных телескопов: NT200, IceCube, ANTARES, KM3NeT.
4. При разработке регистрирующей системы Baikal-GVD использованы современные методики обработки сигналов и передачи данных, основанные на применении наносекундных параллельных АЦП, управляющих систем на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) SPARTAN-6, промышленных Ethernet-технологий.

Личный вклад соискателя:

- Автор принимал участие в экспериментальных исследованиях, обработке и анализе данных, полученных на нейтринном телескопе NT200. Им получен предел на поток нейтрино, сопровождающих гамма-всплески.
- Автор принимал участие в разработке и создании системы сбора данных нейтринного телескопа NT200+.
- Автор разработал общую концепцию и принцип построения системы регистрации и сбора данных установки Baikal-GVD.
- Автор осуществлял руководство исследованиями, разработкой и созданием основных электронных систем нейтринного телескопа: оптического модуля,

измерительного канала на базе наносекундных АЦП, аппаратуры для управления работой, контроля и калибровки детектора.

- Автором были разработаны методы временной и амплитудной калибровки каналов установки и принципы построения системы формирования триггера.
- С 2007 года автор руководит работами по изготовлению, наладке и тестированию аппаратуры Baikal-GVD.
- Автор участвовал в экспериментах на озере Байкал с 2004 года. С 2007 года руководил работами по наладке и натурным испытаниям глубоководных установок во время экспедиций на оз. Байкал.
- При непосредственном участии автора подготовлены основные публикации по выполненной работе.

На заседании 15.02.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Айнутдинову В.М. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **18** человек, из них **6** докторов наук по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из **26** человек, входящих в состав совета, проголосовали: за **18**, против - **нет**, недействительных бюллетеней - **нет**.

Председатель

диссертационного совета Д 002.119.01

д.ф.-м.н., академик РАН

\_\_\_\_\_ Рубаков В.А.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

д.ф.-м.н., член-корр. РАН

\_\_\_\_\_ Троицкий С.В.

15.02.2018г.

МП