

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»

д.с.н., доцент Григоричев К.В.



2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» на диссертацию

Щепетова Александра Леонидовича «Аппаратурно-программный комплекс для исследования космических лучей и геофизических процессов на Тянь-Шаньской высокогорной станции», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

Тема представленной на рассмотрение диссертации связана с дальнейшим развитием Тянь-Шаньской высокогорной научной станции Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ТШВНС). На протяжении двух последних десятилетий на станции, изначально создававшейся в середине 1960-х годов для проведения экспериментов, связанных с исследованиями космических лучей, шел процесс масштабного развития и модернизации имеющихся здесь экспериментальных установок. Цель этих работ заключалась в создании здесь, на основе современных электронных и информационных технологий, нового многофункционального научного центра, соответствующего современному уровню развития техники физического эксперимента и предназначенного для исследований, связанных с широким кругом физических проблем. Предмет диссертации составляет разработка и создание экспериментальных установок для обновленного научного центра ТШВНС, а также алгоритмов и программ обработки поступающей от этих установок научной информации.

Физические задачи для исследований, которые предполагалось вести по завершении процесса модернизации на многофункциональном экспериментальном комплексе Тянь-Шаньской станции, кратко перечислены во вводном разделе рассматриваемой диссертации. К таким задачам относятся дальнейшее исследование частиц космических лучей, принадлежащих к энергетическому диапазону $E_0 = (10^{14} - 10^{17})$ эВ, и, в первую очередь, получение новой информации о характеристиках взаимодействия таких частиц с веществом в энергетической области излома первичного спектра при $E_0 \sim 3$ ПэВ, который, как известно, до сих пор не получил общепринятого

объяснения, и где наблюдается ряд аномальных явлений, недостаточно понятных с точки зрения теорий взаимодействия элементарных частиц, основанных на современных ускорительных данных. Помимо исследования взаимодействий элементарных частиц в космических лучах сверхвысокой энергии, установки нового экспериментального комплекса ТШВНС должны обеспечить многолетний непрерывный мониторинг интенсивности как непосредственно космических лучей в диапазоне энергии $E_0 = (1 - 100)$ ГэВ, так и различных компонент радиационного фона (нейтроны, мягкое гамма-излучение, электронная компонента), который образуется при взаимодействии космических лучей с веществом окружающей среды. Эта информация необходима для построения крупномасштабных моделей гелиосферы, долговременного прогноза солнечной активности, оперативного прогноза радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и других эффектов из области физики солнечно-земных связей. Еще одно направление геофизических исследований на ТШВНС — изучение роли космических лучей в эффектах, связанных с физикой атмосферного электричества, и прежде всего в процессах инициации и развития молниевых разрядов, представляет собой проблему, для решения которой в настоящее время предложен ряд конкурирующих теорий, и к которой привлечен интерес многих исследовательских коллективов по всему миру. Наконец, детектирование сигналов от реакций, индуцированных частицами проникающей компоненты космических лучей — мюонами высокой энергии, может оказаться эффективным средством исследования сейсмических процессов, протекающих в земной коре. Поиск и исследование таких сигналов представляет собой еще одно направление экспериментальных исследований на Тянь-Шаньской высокогорной станции. Таким образом, исходя из ряда актуальных для современного естествознания тем, во вводном разделе диссертации обоснована необходимость развития экспериментального комплекса ТШВНС, сформулированы конкретные задачи, решавшиеся в ходе модернизации, объясняются новизна и практическая значимость предложенных для этих задач технических решений.

В соответствии с перечисленными направлениями исследований построена структура диссертации. Сама диссертационная работа представляет собой законченный труд, состоящий из введения, первой, вводной, главы, в которой подробно рассматриваются общая схема многофункционального комплекса детекторов Тянь-Шаньской станции и задачи физических исследований, для решения которых были изначально предназначены образующие его установки, и пяти последующих глав, каждая из которых посвящена детальному описанию отдельной установки: проблем, которые встретились при ее создании, выбранных путей их решения и разработанных для этих целей аппаратных и программных средств. Диссертация представлена на 316 страницах, включая 102 рисунка. Список литературы составляет 332 наименования.

Основное содержание диссертации разбито на пять глав, пронумерованных со второй по шестую.

Во второй главе рассматривается центральная подсистема экспериментального комплекса ТШВНС — т. н. ливневая установка, то есть распределенная система детекторов для регистрации частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ) — каскадов, которые порождаются частицами космических лучей при их взаимодействии с веществом земной атмосферы. Во второй главе представлены разработки новой аппаратуры для этой установки: конструкция детектора с расширенным динамическим диапазоном измерения плотности потока заряженных частиц, многоканальная система сбора данных от системы таких согласованно работающих детекторов, триггерная схема для выделения событий ШАЛ, аппаратные средства контроля за работой детекторов ливневой установки, а также программное обеспечение, необходимое для управления ливневой системой в процессе проведения измерений. Далее рассматриваются алгоритмы и ряд реализующих их программ, разработанные для анализа поступающей от ливневой установки данных и определения на их основе параметров регистрируемых ШАЛ. Заканчивается вторая глава описанием вновь созданного на ТШВНС информационного комплекса — системы взаимосвязанных баз данных для хранения информации, полученной в ходе всех проводимых здесь экспериментов, и совокупности программ, обеспечивающих доступ к этой информации сторонним пользователям, в том числе и по сети Интернет. В ходе обсуждения всех связанных с ливневой системой разработок постоянно подчеркивается их адекватность поставленной задаче — получению новых, недоступных в прежних экспериментах, сведений о характеристиках ШАЛ, которые могут оказаться полезными для решения проблемы излома в первичном спектре космических лучей. Надежность вновь разработанных методик измерений и алгоритмов обработки информации подтверждается сравнением результатов, полученных на их основе в период тестовой эксплуатации экспериментального комплекса ТШВНС в 2015–2019 годах, с данными прежних экспериментов, которые проводились ранее как на Тянь-Шаньской станции, так и в независимых научных группах.

Третья и четвертая главы диссертации посвящены применению нейтронных детекторов в экспериментальных установках ТШВНС, связанных с изучением космических лучей и ШАЛ: нейтронного монитора в качестве детектора адронной компоненты космических лучей, нейтронных детекторов с низким энергетическим порогом для регистрации сопровождающего прохождение мощных ШАЛ потока тепловых нейтронов, и детекторов мягкого гамма-излучения, которое образуется при захвате таких нейтронов ядрами окружающей среды. В каждой из этих глав поочередно рассматриваются физические принципы, на которых основано функционирование данного детектора ТШВНС, разработанная для него конструкция, методика анализа поступающей от детектора информации, вновь созданное программное обеспечение для управления процессом измерений и относящиеся к данному детектору структуры в общем информационном комплексе ТШВНС. При обсуждении физических принципов и методов анализа систематически используются результаты моделирования, которое проводилось на основе

пакета Geant4 с использованием программных моделей, разработанных для каждого типа детекторов. Поскольку при анализе нейтронных данных существенно влияние внешней среды, в этих расчетах учитывались потоки фоновых нейтронов, гамма-излучения и заряженных частиц, которые были получены с применением моделей характерных для ТШВНС внешних объектов, окружающих нейтронные детекторы: атмосферный воздух, грунт, строительные конструкции и т. п. Каждая из посвященных нейтронным детекторам глав заканчивается обзором новых экспериментальных результатов, которые были получены в период тестовой эксплуатации Тянь-Шаньской установки. При обсуждении этих данных неоднократно подчеркивается то обстоятельство, что применение нейтронных детекторов в экспериментах, связанных с регистрацией событий ШАЛ, открывает новый, ранее не использовавшийся канал для получения информации о характеристиках протекающих при сверхвысоких энергиях адронных взаимодействий. С другой стороны, предусмотренный в новых системах сбора данных режим регулярных измерений интенсивности сигналов с произвольной периодичностью дает возможность проводить исследования, основанные на непрерывном мониторинге радиационного фона окружающей среды на протяжении длительных (месяцы и годы) интервалов времени, что расширяет информативность вновь созданного экспериментального комплекса.

В пятой главе диссертации обсуждается использование разработанной на ТШВНС техники регистрации нейтронных сигналов для исследования мюонной компоненты космических лучей. Так же, как и в предыдущих двух главах, эффективность предложенных методов иллюстрируется новыми физическими результатами о мюонах ШАЛ, которые были получены на новых установках Тянь-Шаньской станции в 2015–2019 годах.

Наконец, темой шестой главы диссертации является применение вновь созданных на ТШВНС методик в экспериментах геофизической тематики: для получения информации о процессах, происходящих при развитии атмосферных электрических разрядов в грозовых облаках, и при поиске сигналов сейсмического происхождения, коррелирующих с прохождением энергичных частиц проникающей компоненты космических лучей. Глава начинается с описания расчета ожидаемых характеристик потока излучений различного типа, генерируемых при развитии электронно-фотонных лавин в электрическом поле грозового облака, который проводился на основе пакета Geant4 для конкретных условий Тянь-Шаньской высокогорной станции. Согласно результатам моделирования, среди подобных сигналов должно преобладать мягкое (десятки-сотни кэВ) гамма-излучение, угловое распределение которого сконцентрировано вдоль направления электрического поля, а интенсивность быстро уменьшается по мере удаления от области разряда. Исходя из этих данных, на ТШВНС были оборудованы высотные пункты размещения детекторов, которые во время гроз могут с высокой вероятностью оказаться внутри грозовых облаков, непосредственно внутри пространственной области генерации молниевых разрядов. Соответственно, для этих пунктов пришлось разрабатывать специальную электронную аппаратуру и создавать методику

проведения измерений, которые позволяли бы вести стабильную регистрацию потоков частиц на небольшом (менее километра) расстоянии от канала развивающейся молнии, под воздействием исключительно высоких электромагнитных помех. Принятые для этой цели технические решения рассматриваются в шестой главе диссертации, совместно с демонстрирующими их эффективность результатами наблюдений молниевых разрядов во время грозовых сезонов 2015–2019 годов: временными и энергетическими распределениями интенсивности ускоренных электронов и гамма-квантов на расстоянии $\sim(50\text{--}100)$ м от молниевых разрядов в событиях, относящихся к различным типам грозовой активности; синхронными записями излучения от молний в радио-, оптическом и гамма-диапазонах электромагнитного спектра; данными по молниевым события с различными особенностями в спектре излучений: кратковременные (<100 мкс) импульсы гамма-излучения на начальной стадии разряда, «голубые» и «красные» вспышки с максимальной амплитудой соответственно в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах длин волн, «темные» разряды без заметного излучения в оптическом диапазоне. Все эти данные необходимы для разработки современных моделей развития молний. Помимо исследования молний, разработанная для использования на высотных пунктах аппаратура и программное обеспечение нашли себе применение в эксперименте по регистрации акустических сигналов сейсмического происхождения, в результате которого на ТШВНС были впервые обнаружены ранее неизвестные, статистически значимые корреляции между такими сигналами и прохождением проникающих частиц, которые следовали в составе мощных ШАЛ. Описанию этого эксперимента посвящены заключительные разделы шестой главы.

Таким образом можно констатировать, что в результате представленных в диссертации работ на Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН создан уникальный многофункциональный научный комплекс, который не имеет мировых аналогов по своей информативности, высокогорному расположению, разнообразию используемых детекторов, и который позволяет проводить взаимосвязанные исследования в различных областях экспериментальной физики: физики космических лучей и элементарных частиц, астрофизике, атмосферной физики высоких энергий, геофизики и сейсмологии.

Достоверность данных по широким атмосферным ливням, полученным на новой ливневой установке ТШВНС, обеспечивается положительным результатом их сравнения с известными результатами предыдущих экспериментов в области перекрытия регистрируемых параметров. Результаты модельных расчетов, выполнявшихся на основе пакета Geant4 для характеристик нейтронных детекторов, согласуются в области перекрытия параметров с данными измерений, проводившихся как в космических лучах, так и на ускорителях. Результаты прецизионных измерений интенсивности космических лучей, которые в течение последних лет непрерывно ведутся с помощью вновь созданной системы сбора данных на нейтронном мониторе Тянь-Шаньской станции, соответствуют данным мировой сети по вариациям космических лучей. Результаты по регистрации излучений от молниевых

разрядов во время гроз согласуются с данными аналогичных измерений, которые проводятся по всему миру.

Все перечисленные в заключении результаты, которые выносятся автором на защиту, представлены в основных публикациях, указанных в автореферате. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. Некоторые утверждения, касающиеся качества работы детекторов ТШВНС носят словесный характер, не подтверждены реальными результатами измерений, графиками, численными характеристиками, так в отношении сцинтилляционных детекторов разработки ИФВЭ на стр.63 написано «В то же время равномерное расположение световодов по всей площади сцинтиллятора обеспечивает хорошую однородность светосбора и независимость амплитуды регистрируемого на выходе ФЭУ электрического импульса от места прохождения частицы.» До какой степени «хорошую»? Не ясно.
2. Из текста на стр.69 не ясно, насколько существенно влияет на возможность решения поставленных задач величина мертвого времени обработки событий, которое представляется значительным.
3. Из раздела 2.2.2 не ясно, для решения каких задач используется каждый из используемых триггеров, вырабатываются ли они параллельно.
4. Результаты измерений, проделанных на новой сцинтилляционной установке, сравниваются с результатами ранее проведенных исследований, но в диссертации не приводится сравнение с результатами моделирования новой установки.
5. Предложенный в главе 2 метод определения параметров ШАЛ основан на использовании функции Нишимуры-Каматы-Грейзена для аппроксимации экспериментально измеренных распределений ливневых частиц. Как известно, функция НКГ справедлива для чисто электромагнитных каскадов, и применение ее при анализе ливней, абсолютное большинство которых создается частицами ядерно-активной компоненты космических лучей, недостаточно корректным.
6. Излишне много в диссертации отведено подробному описанию технических деталей разработанной аппаратуры и применяемых для управления ею программных средств.
7. Представленные в диссертации эксперименты по регистрации нейтронного сопровождения ШАЛ основаны на использовании газоразрядных счетчиков со специальным газовым наполнением, делающим их чувствительными к потоку тепловых нейтронов. Между тем известно, что для таких счетчиков характерна большая продолжительность мертвого времени, и их временное разрешение может оказаться недостаточным для регистрации интенсивных потоков адронной компоненты в центральной области ШАЛ с большой первичной энергией.
8. Модель Geant4, которая используется в разделе 6.1 для анализа процессов, происходящих при развитии электронно-фотонных лавин в грозовых облаках,

представляется излишне упрощенной, а выводы, сделанные в результате этого анализа — чисто качественными.

9. В разделе, посвященном регистрации излучений от молниевых разрядов, представлены измерения электрического поля и данные, полученные от приемников электромагнитного излучения в различных диапазонах частот, но в диссертации отсутствует какое-либо упоминание об использовавшихся для этой цели датчиках поля и приемниках радио-излучения.

Отмеченные недостатки не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Автор внес существенный вклад в развитие экспериментального комплекса Тянь-Шаньской высокогорной станции и разработку современных методик проведения исследований на его детекторах, а для ряда подсистем — нейтронные детекторы, высотные детекторы для регистрации излучений от молний, детекторы сейсмических сигналов, информационный комплекс ТШВНС — его участие было решающим в их создании. По своей актуальности, новизне и практической значимости полученных результатов диссертация Щепетова А.Л. «Аппаратурно-программный комплекс для исследования космических лучей и геофизических процессов на Тянь-Шаньской высокогорной станции» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335. Щепетов Александр Леонидович полностью заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составил:

декан физического факультета ФГБОУ ВО «ИГУ»,
Заведующий отделом элементарных частиц и нейтринной астрофизики
НИИПФ ИГУ

Доктор физ-мат. наук
Тел.: +7(3952)33-21-70,
Эл. адрес: nbudnev@api.isu.ru

Н. М. Буднев

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на семинаре отдела элементарных частиц и нейтринной астрофизики научно-исследовательского института прикладной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» (НИИПФ ИГУ) «17» декабря 2020года.

Директор НИИПФ ИГУ
Кандидат физ-мат. наук

А. Б. Танаев

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ИГУ»).

664003 г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

тел.: (3952) 521-931, факс: 24-22-38, эл. адрес: office@admin.isu.ru

Публикации сотрудников Иркутского государственного университета по теме диссертаций:

1. Budnev N., Astapov I., Bezyazeekov P., et al. TAIGA—A hybrid array for high-energy gamma astronomy and cosmic ray physics // Nucl. Instrum. Methods A, 958 (2020) 162113.
2. Kuzmichev L., Astapov I., Bezyazeekov P., et al. Cherenkov EAS arrays in the Tunka astrophysical center: From Tunka-133 to the TAIGA gamma and cosmic ray hybrid detector // Nucl. Instrum. Methods A, 952 (2020) 161830.
3. Budnev N., Chiavassa A., Gress O., et al. The primary cosmic ray energy spectrum measured with the Tunka-122 array // Astropart. Phys. 117 (2020) 102406.
4. Astapov I., Bezyazeekov P., Borodin A., et al. Scintillation detectors for the TAIGA experiment // Nucl. Instrum. Methods A, 936 (2019) 254–256.
5. Коротаев С. М., Буднев Н. М., Сердюк В. О. и др. Байкальский электромагнитный эксперимент // Геофизические процессы и биосфера, Т. 17, №4 (2018) 92–126.
6. Коротаев С. М., Буднев Н. М., Сердюк В. О. Связь длиннопериодных вариаций вертикальной компоненты электрического поля в Байкале с солнечной активностью // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 58, №1 (2018) 149–152.
7. Budnev N., Monkhoev R., Pakhorukov A., et al. Reconstruction of cosmic ray air showers with Tunka-Rex data using template fitting of radio pulses // Phys.Rev., D97 (2018) 10.
8. Troja E., Lipunov V., Mundel C., et al. Significant and variable linear polarization during the prompt optical flash of GRB160625BE // Nature, 7664 (2017) 425–427.
9. Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D., et al. Multi-messenger observations of a binary neutron star merger // Astrophys. J. Lett., 848 (2017) L12.
10. Budnev N., Astapov I., Bezyazeekov P., et al. The TAIGA experiment: From cosmic ray to gamma ray astronomy in the Tunka valley // Nucl. Instrum. Methods A, 845 (2017) 330–333.
11. Budnev N., Astapov I., Bezyazeekov P., et al. TAIGA experiment: present status and perspectives // JINST, 12 (2017) C08018.
12. Avrorin A. D., Avrorin A. V., Aynutdinov P., et al. A search for neutrino signal from dark matter annihilation in the center of the Milky Way with Baikal NT200 // Astropart. Phys. 81 (2016) 12–20.