ОТЗЫВ

официального оппонента Галкина Владимира Игоревича

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

Экспериментальное изучение явлений, вызываемых частицами космических лучей с первичной энергией $10^{14} - 10^{17}$ эВ при их взаимодействии с веществом, представляет собой важное направление современной физики. Вплоть до настоящего времени остаются необъясненными многие явления, которые были обнаружены при исследовании таких взаимодействий. Так, остается непонятной физическая причина, которая приводит к резкому изменению показателя (излому) степенно́го спектра первичных космических лучей в области энергий $3 \cdot 10^{15}$ эВ. В той же области энергетического спектра обнаружен ряд других явлений, которые до сих пор не получили объяснения: частота образования гамма-адронных семейств с «гало» и «выстроенностью» энергетических центров при регистрации ядерных реакций, которые вызывались адронами сверхвысоких энергий в рентгенэмульсионных камерах высокогорных экспериментов «Памир» и «Чакалтая»; обнаруженное в эксперименте «Адрон» нарушение скейлинга энергетических спектров гамма-квантов в семействах, принадлежащих к области излома первичного спектра; замедленное поглощение ядерно-активной компоненты космических лучей в атмосфере и в плотном веществе («тянь-шаньский эффект»); противоречие между данными о средней высоте максимального развития широких атмосферных ливней, происходящих от частиц космических лучей, и множественностью мюонной компоненты в этих же ливнях («muon puzzle») и другие аномальные эффекты. Хотя в настоящее время на крупнейших ускорителях (LHC) стало доступным непосредственное исследование взаимодействий частиц с энергиями, соответствующими излому первичного спектра космических лучей, до сих пор в этих экспериментах не удалось обнаружить каких-либо

космических лучей, до сих пор в этих экспериментах не удалось обнаружить каких-либо особенностей, аналогичных эффектам, наблюдаемым в космических лучах. Отсюда следует вывод, что эксперименты на ускорителях и в космических лучах представляют собой два взаимодополняющих подхода к исследованию процессов, протекающих при взаимодействиях элементарных частиц и ускоренных ядер при высокой энергии взаимодействия. С другой стороны, регистрация потока энергичных частиц солнечного и галактического происхождения представляет собой эффективный инструмент для изучения процессов солнечной активности, структуры межпланетного магнитного поля, радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, а вторичные частицы-продукты, которые образуются в реакциях, вызванных взаимодействиями космических лучей в атмосфере, играют важную роль в ряде явлений, относящихся к области ионосферной физики, атмосферного электричества, геофизики.

Принятая в начале 2000-х годов программа развития Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН предусматривала создание нового многофункционального научного центра, предназначенного для выполнения разнообразных экспериментальных исследований, связанных с космическими лучами и эффектами их взаимодействия с веществом земных оболочек. Создание такого центра было основной **целью** представленной на рассмотрение диссертационной работы А.Л. Щепетова «Аппаратурно-программный комплекс для исследования космических лучей и геофизических процессов на Тянь-Шаньской высокогорной станции», **предмет** которой заключается в разработке электронной аппаратуры, алгоритмов обработки данных и программного обеспечения для разнообразных детекторных систем научного центра. Из вышеизложенных соображений следует высокая **актуальность** такой работы в настоящее время.

Новизна обсуждаемой работы заключается в создании автором современного автоматизированного комплекса для сбора, хранения и обработки данных от нескольких весьма разнородных детекторных систем, работающих в горных условиях.

Диссертационная работа включает в себя введение, шесть основных глав и заключение, и изложена на 316 страницах текста, включающих 102 рисунка. Список литературы содержит 332 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель диссертационной работы и решаемые в ходе ее выполнения задачи, представлены новизна и практическая значимость достигнутых результатов, перечислены выносимые на защиту положения, сведения об апробации работы и личном вкладе автора.

Первая глава представляет собой литературный обзор, где формулируются конкретные физические задачи, для решения которых предназначен создававшийся на Тянь-Шаньской станции комплекс экспериментальных установок, и обосновывается их важность на современном этапе развития науки. К таким задачам можно отнести изучение ранее не исследовавшихся параметров широких атмосферных ливней от частиц космических лучей, которые принадлежат к области излома первичного спектра; регистрация, посредством вновь разработанных методик, адронной и мюонной компонент в таких ливнях; регистрация излучений, которые генерируются молниевыми разрядами в атмосфере и выяснение роли космических лучей в этом процессе; детектирование упругих колебаний сейсмического происхождения, возникающих в находящемся в окрестностях Тянь-Шаньской станции глубинном литосферном разломе и поиск корреляций между такими сигналами и энергичными частицами проникающей компоненты космических лучей. В конце первой главы дан обзор современного состояния экспериментального комплекса Тянь-Шаньской высокогорной станции, а также описывается личный вклад автора диссертации в развитие различных подсистем этого комплекса.

Во **второй главе** представлены разработанные автором методы регистрации событий широких атмосферных ливней и обработки данных, полученных в этих измерениях. Корректность предложенных решений подтверждается сравнением результатов, полученных во время эксплуатации новых детекторов Тянь-Шаньской высокогорной станции в 2015–2019 годах, с известными результатами прежних экспериментов. В этих измерениях продемонстрировано главное преимущество новой методики: существенно расширенный динамический диапазон применяемых детекторов обеспечивает свободную от влияния эффектов насыщения регистрацию плотности потока частиц в центральной области ливней, где концентрируются их наиболее энергичные компоненты. Такие измерения необходимы для корректного

восстановления пространственного распределения частиц, оценки размера и первичной энергии ливней и, в конечном итоге, для решения проблемы излома в первичном спектре и объяснения других необычных явлений, наблюдаемых в диапазоне $10^{15} - 10^{17}$эВ. Помимо чисто аппаратурных решений, во второй главе диссертации представлен разработанный автором информационный комплекс — совокупность взаимосвязанных баз данных и программ, обеспечивающих хранение информации обо всех проводимых на Тянь-Шаньской станции экспериментах и доступ к этим данным для их обработки сторонними пользователями.

Третья глава диссертации посвящена разработанной автором методике, которая позволяет применить технику нейтронного монитора в качестве детектора адронной компоненты космических лучей высокой энергии и для исследования характеристик ядерно-активных частиц, следующих в составе широких атмосферных ливней. Эффективность предложенного решения обоснована путем систематического моделирования процессов рождения, диффузии и регистрации испарительных нейтронов в мониторе, которое проводилось с применением созданных автором, на основе современного пакета Geant4, программных моделей нейтронного монитора и окружающих его объектов внешней среды. Далее в главе представлены современная измерительная аппаратура и программные средства, разработанные автором для нейтронного монитора Тянь-Шаньской высокогорной станции. Отмечено, что все вновь созданные технические средства для измерений с нейтронными детекторами позволяют одновременно проводить измерения по двум направлениям: регистрация адронного сопровождения событий ШАЛ для исследования взаимодействий ядерно-активной компоненты космических лучей высокой энергии и прецизионный мониторинг интенсивности нейтронных сигналов, который необходим для задач, связанных с физикой Солнца, гелиосферы, проблемами солнечно-земных связей и других подобных задач. Вновь предложенные методы проиллюстрированы результатами измерений, которые проводились на нейтронном мониторе Тянь-Шаньской станции в 2015–2019 годах.

В **четвертой главе** диссертации описано применение вновь созданных программных, модельных и аппаратных средств работы с нейтронными детекторами для измерения гамма- и нейтронного сопровождения широких атмосферных ливней при низком энергетическом пороге

регистрируемых частиц. Показано, что такой подход открывает новый, ранее не использовавшийся канал получения информации об адронных взаимодействиях в космических лучах. Результативность этой методики иллюстрируется новыми данными об адронной компоненте широких атмосферных ливней в области излома первичного спектра, которые были получены на новых детекторах Тянь-Шаньского экспериментального комплекса.

В **пятой главе** объясняется, как разработанные методики нейтронных измерений и анализа их результатов были адаптированы для применения на подземном детекторе Тянь-Шаньской высокогорной станции в экспериментах по регистрации проникающих частиц космических лучей. Приведенные в этой главе новые данные относительно мюонной компоненты, полученные для широких атмосферных ливней в области излома первичного спектра, демонстрируют эффективность такого, ранее не использовавшегося, подхода к исследованию мюонов.

Шестая глава диссертации посвящена проведению на Тянь-Шаньской высокогорной станции экспериментов геофизической тематики. Исходя из результатов моделирования процессов развития электронно-фотонных лавин в электрическом поле грозового облака, который проводился с помощью разработанной автором программы на основе пакета Geant4, на Тянь-Шаньской станции созданы высотные пункты размещения детекторов. Во время гроз эти детекторы могут оказаться в непосредственной близости (менее километра) от канала молниевого разряда, где происходит интенсивная генерация жестких излучений — потоков ускоренных электронов и гамма-лучей, которые при таком расположении могут эффективно регистрироваться детекторами пункта. Для стабильной работы в такого рода в условиях, под влиянием исключительно высоких электромагнитных помех со стороны близких молниевых разрядов, для высотных пунктов Тянь-Шаньской станции пришлось разрабатывать специальную электронику, программы и методику проведения измерений. Эффективность решений, предложенных для этой цели автором диссертации, иллюстрируется представленными в шестой главе экспериментальными данными по временно́му и энергетическому распределению электронов и гамма-квантов, которые наблюдались на расстоянии ~(50–100) м от молниевых разрядов в событиях, относящихся к различным типам грозовой активности. В настоящее время

подобные данные вызывают большой интерес, поскольку они необходимы для разработки современных моделей развития молнии. Аппаратура и программное обеспечение, разработанные для использования на высотных пунктах Тянь-Шаньской станции, были применены также в оригинальном эксперименте по регистрации упругих колебаний сейсмического происхождения в акустическом диапазоне частот, результаты которого, также представленные в шестой главе, представляют интерес для проблемы долгосрочного прогноза землетрясений в окружающем Тянь-Шаньскую станцию сейсмоопасном регионе.

В **заключении** к диссертации подводятся итоги проделанной работы. Основной ее результат заключается в том, что на Тянь-Шаньской станции ФИАН к настоящему времени создан и введен в эксплуатацию уникальный многофункциональный научный комплекс, который не имеет мировых аналогов по своей информативности, высокогорному расположению, разнообразию используемых детекторов, и который позволяет проводить экспериментальные исследования, связанные с широким кругом актуальных задач, относящихся к физике космических лучей и элементарных частиц, процессам атмосферного электричества, геофизике и сейсмологии. Детекторы нового высокогорного комплекса позволили подробно исследовать пространственную структуру потока частиц широких атмосферных ливней с энергией (10^{14}–10^{17}) эВ, в том числе в их центральной области, что оставалось недостижимым в прежних экспериментах. Применение в составе комплекса нейтронных и гамма-детекторов с низким энергетическим порогом открыло возможность изучать ранее не доступные для регистрации потоки тепловых нейтронов и гамма-квантов, сопровождающих прохождение ливней, что качественно улучшает информативность данных об адронной компоненте ШАЛ. Использование подземных детекторов для регистрации нейтронов, которые рождаются во взаимодействиях энергичных мюонов, позволило обнаружить ранее неизвестные особенности в поведении мюонной компоненты космических лучей. По направлениям, связанным с геофизической тематикой, на Тянь-Шаньской станции ФИАН, впервые в высокогорных условиях, были созданы стационарные высотные пункты размещения детекторов для регистрации излучений, сопровождающих молниевые разряды, вблизи пространственной области их развития, и была разработана практическая методика проведения таких измерений в грозовых облаках. Был

разработан новый метод для оперативного тестирования текущего состояния земной коры в области глубинных разломов, основанный на корреляциях между акустическими сигналами сейсмического происхождения и прохождением мюонов высокой энергии, связанных с мощными ШАЛ. Была разработана соответствующая аппаратура, и впервые проведены тестовые эксперименты по поиску таких коррелированных сигналов. Вся разработанная для различных подсистем многофункционального научного комплекса Тянь-Шаньской станции аппаратура обладает высоким потенциалом развития, что позволяет, при минимальной модификации программного обеспечения, использовать ее как для измерения скорости счета стандартных цифровых импульсов, так и для сбора информации от датчиков разнообразных, в том числе быстро меняющихся, аналоговых сигналов. Модульный принцип построения, положенный в основу всех детекторных систем, обеспечивает легкость их масштабирования в соответствии с меняющимися задачами исследований.

Все перечисленные в заключении результаты, которые выносятся автором на защиту, представлены в основных публикациях, указанных в автореферате. Текст автореферата достоверно отражает содержание диссертационной работы.

Объем и качество работы, проведенной А.Л. Щепетовым впечатляет. Текст написан очень тщательно и логично и хорошо иллюстрирован.

Единственный недостаток, способный хоть в какой-то степени повлиять на результаты работы – вид формулы (2.14) для $\sigma^2(\rho_D)$, используемой в выражении (2.13) для χ^2 при поиске основных параметров ШАЛ. Формула (2.14) содержит характерные параметры детекторов и электроники, но не включает вариаций плотности, обусловленных каскадным процессом. Формула может быть поправлена, например, путем восстановления параметров искусственных ШАЛ. Дополнительный член для (2.14) в этом случае можно определить, минимизируя различия между истинными и оцененными параметрами искусственных событий.

Отмеченный недостаток не влияет на общую высокую 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 молнии, 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, а ее автор Щепетов Александр Леонидович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики.

27 декабря 2020 г.

Официальный оппонент:

Галкин Владимир Игоревич
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.16 «физика атомного ядра и элементарных частиц», профессор,
Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет
телефон: +7 (495) 939-16-82, e-mail: v_i_galkin@mail.ru

Декан физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова профессор Н.Н.Сысоев

Список основных публикаций по теме диссертации за 2015–2020 годы:

1. Investigation of the energy spectrum and chemical composition of primary cosmic rays in 1–100 PeV energy range with a UAV-borne detector / Chernov D.V., Bonvech E.A., Finger M. et al. // Journal of Instrumentation. – 2020 – Vol.15, No. 9, pp.1-11.
2. Spatial and temporal structure of EAS reflected Cherenkov light signal / R. A. Antonov, E.A. Bonvech, D. V. Chernov et al. // Astroparticle Physics. — 2019. — Vol. 108. — P. 24–39.
3. Method of EAS's Cherenkov and fluorescent light separation using silicon photomultipliers / Chemov D., Bonvech E., Dzhatdoev T. et al. // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1181. — P. 012025.
4. Muon radiography method for non-invasive probing an archaeological site in the Naryn-Kalacitadel / Abiev A., Bagulya A., Chernyavskiy M. et al. // Applied Sciences-Basel – 2019 – Vol. 9, No.10, p.2040.
5. Muonography of large natural and industrial objects / Abiev A.K., Bagulya A.V., Chernyavsky M.M. et al. // Physics of Atomic Nuclei – 2019 – Vol.82, No.6, pp.804-808.
6. A method for estimation of the parameters of the primary particle of an extensive air shower by a high-altitude detector / Galkin V.I., Borisov A.S., Bakhromzod R., Batraev V.V.,Latipova S.Z., Muqumov A.R. // Moscow University Physics Bulletin – 2018 – Vol.73, No.2, pp.179-186.
7. Wide-field gamma-spectrometer BDRG: GRB monitor on-board the Lomonosov Mission / Svertilov S.I., Panasyuk M.I., Bogomolov V.V. et al. // Space Science Reviews – 2018 – Vol.214, No.1, p.8.
8. CORONAS-F observation of gamma-ray emission from the solar flare on 2003 October 29 / Kurt V.G., Yushkov B.Yu, Galkin V.I., Karel Kudela, Kashapova L.K. // New Astronomy. — 2017. —V. 56. — P. 102-112.

9. The Sun and Heliosphere Explorer – The Interhelioprobe Mission / Kuznetsov V.D., Zelenyi L.M., Zimovets I.V. et al. // Geomagnetism and Aeronomy – 2016 – Vol.56, No.7, pp.781-841.
10. Instruments to study fast neutrons fluxes in the upper atmosphere with the use of high-altitude balloons / Iyudin A.F., Bogomolov V.V., Galkin V.I. et al. / Advances in Space Research – 2015 – Vol.56, No.10, pp.2073-2079.
11. Test experiments on muon radiography with emulsion track detectors in Russia / Aleksandrov A.B., Bagulya A.V., Chernyavsky M.M. et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters – 2015 – Vol.12, No.5, pp.713-719.
12. Event-by-event study of CR composition with the SPHERE experiment using the 2013 data / Antonov R.A., Aulova T.V., Bonvech E., T. et al. // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 632. — P. 012060.