

На правах рукописи



**Щепетов Александр Леонидович**

**Аппаратурно-программный комплекс для исследования  
космических лучей и геофизических процессов  
на Тянь-Шаньской высокогорной станции**

Специальность 01.04.01 —  
«приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физический Институт имени П. Н. Лебедева Российской Академии Наук.

Научный консультант: **Рябов Владимир Алексеевич**,  
доктор физико-математических наук,  
Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
зам. директора по научной работе

Официальные оппоненты: **Петрухин Анатолий Афанасьевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Научно-образовательный центр НЕВОД Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, главный научный сотрудник

**Галкин Владимир Игоревич**,  
доктор физико-математических наук,  
Физический факультет МГУ, профессор

**Лубсандоржиев Баярто Константинович**,  
доктор физико-математических наук,  
Институт ядерных исследований РАН, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Иркутский государственный университет

Защита состоится «1» февраля 2021 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 при ФГБУН Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991 ГСП-1 г. Москва, Ленинский пр., д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН и на сайте ФИАН <https://www.lebedev.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119991 ГСП-1 г. Москва, Ленинский пр., д. 53, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.023.04.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 202    г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 002.023.04, д.ф.-м.н.

Баранов С.П.

## Общая характеристика работы

В течение двух десятилетий на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН (ТШВНС) создавался новый многоцелевой комплекс экспериментальных установок, которые предназначены как для проведения исследований в области физики космических лучей (КЛ), принадлежащих к диапазону энергий  $10^{14}$ – $10^{17}$  эВ, так и для изучения той роли, которую взаимодействия КЛ с веществом атмосферы и земной коры могут играть в развитии разнообразных геофизических процессов. С этой целью на станции, наряду с детекторами частиц-компонент КЛ различного типа, разрабатывались специальные системы детекторов, предназначенные для исследования атмосферных электрических разрядов, эффектов сейсмической активности и вопросов, связанных с проблемой прогноза землетрясений.

**Предмет** настоящей диссертации заключается в создании аппаратуры и программного обеспечения, необходимых для проведения измерений на современном комплексе детекторов ТШВНС и для обработки полученной в результате этих измерений информации.

**Актуальность темы.** К настоящему времени история исследования космических лучей (КЛ) в диапазоне первичных энергий  $10^{14}$  –  $10^{17}$  эВ насчитывает не менее полувека, но несмотря на это в их свойствах остается много непонятого. В первую очередь к таким невыясненным вопросам следует отнести природу известного излома — резкого изменения показателя в степенном спектре КЛ, которое происходит при первичной энергии  $E_0 \approx 3 \cdot 10^{15}$  эВ<sup>1</sup>. Помимо излома, в той же области значений  $E_0$  был обнаружен ряд других эффектов, которые до сих пор не получили общепринятого объяснения: образование экзотических гамма-адронных семейств с «гало»<sup>2</sup> и «выстроенностью» энергетических центров<sup>3</sup> при адронных взаимодействиях сверхвысоких энергий; замедленное поглощение адронной компоненты КЛ<sup>4</sup>; нарушение скейлинга в спектрах гамма-квантов в семействах, образованных адронами широких атмосферных ливней (ШАЛ) с  $E_0 \approx 10^{16}$  эВ<sup>5</sup>; избыточная генерация нейтронов

---

<sup>1</sup> Куликов Г. В., Христиансен Г. Б., ЖЭТФ **35**, 635–640 (1958).

<sup>2</sup> Muchamedshin R. A. et al., Bul. of the Lebedev Phys. Inst. **45**, 380 (2018); arXiv:1804.04220.

<sup>3</sup> Maximenko V. M. et al., Phys. of Element. Part. and Atomic Nucl. **36**, 1227 (2005); arXiv:1805.00971.

<sup>4</sup> Borisov A. S. et al., EPJ Web of Conf. **208**, 06001 (2019); DOI:10.1051/epjconf/201920806001.

<sup>5</sup> Shaulov S. B. et al., EPJ Web of Conf. **145**, 17001 (2017); DOI:10.1051/epjconf/201614517001.

при взаимодействии таких адронов с веществом<sup>6</sup>. К аномалиям того же рода можно отнести трудности в согласовании результатов различных экспериментов по определению массового состава первичных КЛ<sup>7,8</sup> и превышение значениями множественности мюонов, которые регистрируются в ШАЛ с  $E_0 \gtrsim 10^{16}$  эВ, оценок, основанных на современных моделях адронного взаимодействия<sup>9</sup>. При обсуждении подобных фактов в научной литературе неоднократно отмечалось, что к настоящему времени данный диапазон энергий оказался доступен для непосредственного исследования на крупнейших ускорителях, таких как ЛНС, и до сих пор в столкновениях ускоренных протонов и ионов не было обнаружено каких-либо принципиальных отклонений от Стандартной модели взаимодействий<sup>10</sup>. Одно из объяснений этого факта может заключаться в том, что геометрия связанных с КЛ экспериментов позволяет исследовать крайнюю фрагментационную область фазового пространства, изучение которой на ускорителях затруднено. Также следует учитывать то обстоятельство, что в случае КЛ мы имеем дело со взаимодействиями разнообразных тяжелых ядер, в которых могут присутствовать нетривиальные эффекты, остающиеся незамеченными на ускорителях<sup>11,12</sup>. Наконец, до сих пор нельзя исключить возможность присутствия в потоке КЛ какой-либо необычной компоненты с аномальными свойствами<sup>13</sup>. Таким образом, исследования адронных взаимодействий на ускорителях и в экспериментах с КЛ оказываются взаимодополняющими друг друга. Исходя из этих соображений, принятая в начале 2000-х годов программа развития ТШВНС предусматривала создание современного комплекса детекторов для исследования ШАЛ, образованных частицами КЛ с энергией  $E_0 \simeq (10^{14} - 10^{17})$  эВ. Комплекс включает в себя ливневую установку — систему синхронно работающих детекторов, которые обеспечивают одновременную регистрацию электронно-фотонной, адронной и мюонной компонент ШАЛ, детекторы черенковского и радио-излучения от ливневых частиц и детекторы связанных с прохождением ШАЛ нейтронов и гамма-излучения низкой энергии.

---

<sup>6</sup>Chubenko A. P. et al., *J. Phys. G*, **28**, 251–266 (2002); DOI:10.1088/0954-3899/28/2/306.

<sup>7</sup>Antoni T. et al. *Astropart. Phys.* **16**, 373 (2002); DOI:10.1016/S0927-6505(01)00120-7.

<sup>8</sup>Apel W. D. et al. *Astropart. Phys.* **47**, 54 (2013); DOI:10.1016/j.astropartphys.2013.06.004.

<sup>9</sup>Dembinski H. P. et al. *EPJ Web of Conf.* **210**, 02004 (2019); DOI:10.1051/epjconf/201921002004.

<sup>10</sup>Menjo H. et al. *JPS Conf. Proc.* **19**, 011017 (2018); DOI:10.7566/JSPCP.19.011017.

<sup>11</sup>Petrukhin A. A., *EPJ Web of Conf.* **99**, 12004 (2015); DOI:10.1051/epjconf/20159912004.

<sup>12</sup>Bogdanov, A. et al., *Proc. XXV ECRS* (2016); arXiv:1701.06841.

<sup>13</sup>Shaulov S. B., *EPJ Web of Conf.* **208**, 02004 (2019); DOI:10.1051/epjconf/201920802004.

Наряду с изучением характеристик ШАЛ представляют интерес прецизионные измерения интенсивности первичных КЛ в энергетическом диапазоне  $E_0 \simeq (10^9 - 10^{11})$  эВ. Непрерывные многолетние ряды данных по вариациям этой интенсивности используются для разработки моделей гелиосферы, для исследования различных эффектов в области физики солнечно-земных связей, для построения долговременных прогнозов солнечной активности и радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве. Традиционным средством для исследования вариаций интенсивности первичных КЛ служат нейтронные мониторы различной конструкции<sup>14</sup>. Один из таких приборов, нейтронный супермонитор 18NM64, входящий в общемировую сеть исследования вариаций, на протяжении многих лет эксплуатируется на ТШВНС. В ходе общей модификации многоцелевого экспериментального комплекса станции для этого детектора разрабатывались новая электроника, программы управления ходом измерений, а также современная информационная система для сбора, хранения и представления данных о текущей интенсивности КЛ в режиме реального времени.

В настоящее время большое внимание уделяется выявлению связей между взаимодействиями энергичных частиц космического происхождения и различными геофизическими явлениями. В частности, интересна та роль, которую частицы КЛ и порождаемые ими ШАЛ могли бы играть в процессе зарождения и развития молний. До настоящего времени в научном сообществе не сложилось какой-либо общей теории образования молнии, несмотря на то, что такая теория была бы крайне необходимой для построения эффективных систем грозозащиты, защиты высотных летательных аппаратов и других целей. Соответственно, в последние годы выделилась отдельная область исследований, посвященных этому вопросу — атмосферная физика высоких энергий<sup>15</sup>.

Для понимания механизмов, определяющих развитие молнии, необходимы данные об излучениях различного типа, которые генерируются при электрических разрядах в атмосфере: потоках ускоренных электронов и сопровождающих их гамма-квантов, нейтронов, радио- и оптического излучения в различных диапазонах длин волн. Регистрация таких явлений как в атмосфере, с помощью наземных установок, так и со спутников, в ближнем космическом пространстве, составляет предмет большого числа работ, которые с начала 2000-х годов проводятся по всему миру. В частности, подобного рода исследования

---

<sup>14</sup>Stoker P. H. et al., *Space Sci. Rev.* **93**, 361 (2000); DOI:10.1023/A:1026560932107.

<sup>15</sup>Dwyer J. R., Uman M. A. *Phys. Rep.* **534**, 147 (2014); DOI:10.1016/j.physrep.2013.09.004.

выполнялись на ряде высокогорных установок: на Баксане<sup>16</sup>, на горе Арагац<sup>17</sup> и в Тибете<sup>18</sup>. ТШВНС также представляет собой удобную площадку для экспериментов такого рода, так как во время летнего сезона грозовые облака здесь движутся на небольшой высоте, начиная от 0.05–0.5 км, что позволяет проводить достаточно эффективную регистрацию излучения от молниевых разрядов с помощью разнообразных детекторов, которые можно размещать как на территории самой станции, так и на склонах и вершинах окружающих гор. Кроме того, наличие на станции ливневой установки позволяет проводить исследования, связанные с активно обсуждаемым в настоящее время вопросом о роли частиц ШАЛ в иницировании молний. Поэтому в составе многоцелевого экспериментального комплекса ТШВНС непрерывно развивается система детекторов «Гроза», включающая в себя детекторы для регистрации электронов, гамма-излучения и нейтронов, датчики электрического поля и электрических разрядов, детекторы электромагнитного излучения молний в оптическом и радио-диапазоне, специально предназначенные для устойчивой работы во время гроз.

Другое направление исследований геофизической тематики, развиваемое на ТШВНС, заключается в поиске возможной связи между КЛ и сейсмическими эффектами. Известно, что в механически напряженной твердой среде, которая образуется при взаимном смещении соседних слоев на разломе земной коры, возникновение микротрещин приводит к генерации упругих колебаний, которые затем распространяются в виде звуковой волны и могут быть зарегистрированы на поверхности Земли. Согласно одной из гипотез, роль триггерного воздействия, провоцирующего образование таких трещин, могут сыграть каскадные ливни частиц, которые рождаются при взаимодействии энергичных мюонов КЛ с веществом литосферы на большой глубине, вплоть до нескольких километров, под поверхностью. Теория такого механизма, который, в случае его реализации, мог бы оказаться весьма полезным для слежения за уровнем сейсмической активности в окружающем регионе, и, в частности, для прогноза землетрясений, разрабатывалась в ИФЗ РАН и ФИАН<sup>19,20</sup>. На ТШВНС уникальным образом сочетаются все необходимые условия для эффективной проверки этой теории: здесь имеются ливневая установка и мюонные детекторы, которые

<sup>16</sup>Khaerdinov N., Lidvansky A., Proc. TEPA 2015, 35 (2016).

<sup>17</sup>Chilingarian A. et al., Sci. Rep. **9**, 6253 (2019); DOI:10.1038/s41598-019-42786-7.

<sup>18</sup>Bartoli B. et al., Phys. Rev. D **97**, 042001 (2018); DOI:10.1103/PhysRevD.97.042001.

<sup>19</sup>Царев В. А. УФН **147**, 426 (1985); DOI:10.3367/UFNr.0147.198510m.0426.

<sup>20</sup>Gusev G. A. et al. Bull. Lebedev Phys. Inst. **38**, 374 (2011).

могут обеспечить непрерывный мониторинг событий ШАЛ, служащих источником энергичных мюонов, а сама станция располагается в сейсмически активном регионе, непосредственно над глубинным литосферным разломом. С этой целью на станции проводятся эксперименты по поиску коррелированных с прохождением мощных ШАЛ упругих колебаний в акустическом диапазоне частот.

**Основная цель** представленных в настоящей диссертации работ заключается в создании современного многофункционального комплекса научных детекторов и необходимого для них программного обеспечения, которые предназначены для проведения высокогорных экспериментов, связанных с решением ряда актуальных проблем в области физики КЛ и геофизики.

Для достижения поставленной цели в ходе выполнения работы решались следующие конкретные **задачи**:

1. Разработка и создание на основе современной электроники детекторных подсистем, которые используются при регистрации различных компонент КЛ: пространственно распределенной системы детекторов заряженных частиц ШАЛ (ливневой установки), нейтронных, мюонных и гамма-детекторов. Разработка аппаратуры для сбора поступающей от этих детекторов информации, алгоритмов и программ управления процессом измерений.
2. Создание системы детекторов для одновременной регистрации различных излучений, которые генерируются при электрических разрядах в грозовых облаках. Развитие экспериментальной техники, обеспечивающей проведение стабильных измерений в высокогорных условиях во время гроз и в непосредственной близости (менее километра) к области молниевых разрядов. Создание специализированных для таких условий работы систем сбора данных и их программного обеспечения.
3. Создание единой системы для сейсмологических исследований, включающей в себя акустические, гамма- и нейтронные детекторы для мониторинга радиационных условий под поверхностью земной коры. Разработка аппаратуры и программ для управления такими измерениями, для сбора и обработки поступающей от этих детекторов информации.
4. Разработка математических методов для определения основных параметров ШАЛ на основе данных, поступающих от новой ливневой установки, а также реализующих эти методы программ.

5. Разработка на основе программного пакета Geant4 расчетных моделей, учитывающих специфические условия ТШВНС. Проведение основанных на этих моделях расчетов для определения вероятности регистрации нейтронов детекторами различного типа, влияния факторов окружающей среды на процессы регистрации частиц, ожидаемых характеристик сигнала от развивающейся в атмосферном электрическом поле электронно-фотонной лавины и других методических задач. Применение результатов этих расчетов при проектировании детекторных систем, для калибровки детекторов и при анализе результатов измерений.
6. Создание информационного комплекса для хранения результатов всех проводимых на ТШВНС экспериментов в виде совокупности взаимосвязанных баз данных с локальным или удаленным (по сети Интернет) доступом.
7. Проведение калибровочных и тестовых измерений на новом многоцелевом комплексе детекторов ТШВНС для проверки его устойчивой работы в течение длительного времени. Обработка полученных в этих измерениях данных и их сопоставление с известными результатами прежних экспериментов для контроля работоспособности новых алгоритмов.

**Научная новизна** проделанной работы заключается в следующем.

- Впервые в условиях высокогорья был создан отвечающий современному уровню экспериментальной техники многоцелевой комплекс детекторов для проведения взаимосвязанных исследований в области физики КЛ, атмосферной физики высоких энергий, физики солнечно-земных связей, геофизики.
- Детекторы нового высокогорного комплекса позволили подробно исследовать пространственную структуру потока частиц ШАЛ с энергией  $E_0 \simeq (10^{14} - 10^{17})$  эВ, в том числе в центральной области ливней (на расстоянии  $\lesssim (1-3)$  м от оси), что оставалось недостижимым в прежних экспериментах с КЛ. Применение в составе комплекса нейтронных и гамма-детекторов с низким энергетическим порогом открыло возможность изучать ранее нерегистрировавшиеся потоки тепловых нейтронов и мягких,  $\simeq (30 - 3000)$  кэВ, гамма-квантов в области ствола ШАЛ, 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 КЛ.



- 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.

**Практическая значимость.** Новая ливневая установка ТШВНС обеспечивает измерение плотности потока заряженных частиц и подробное изучение их пространственного распределения в центральной области ШАЛ ( $r \lesssim 1$  м) с первичной энергией вплоть до  $10^{17}$  эВ. Эти данные позволяют с высокой статистической точностью определять энергетический спектр первичных КЛ и исследовать особенности его поведения в этой области энергий. Такая информация необходима для решения проблемы излома спектра КЛ при  $E_0 \approx 3 \cdot 10^{15}$  эВ и объяснения необычных эффектов, которые наблюдаются в этом энергетическом диапазоне. Разработанные для экспериментального комплекса ТШВНС методики измерения плотности потока частиц с большим динамическим диапазоном,  $\sim(10^5 - 10^6)$ , могут применяться на других установках для исследования ШАЛ.

Систематическое использование нейтронных детекторов в экспериментах по регистрации ШАЛ открывает новый, независимый канал для получения информации о свойствах их адронной и мюонной компонент. Эти данные необходимы для решения ряда актуальных проблем физики КЛ: построения моделей адронного взаимодействия при высоких энергиях, определения химического состава первичных КЛ в области излома, объяснения необычных характеристик гамма-адронных семейств и др. Полученный на ТШВНС опыт эксплуатации нейтронных детекторов и анализа полученных от них данных может быть полезен при планировании других экспериментов.

Созданные на ТШВНС программы позволяют использовать пакет Geant4 для моделирования экспериментальных установок, предназначенных для исследования КЛ и процессов их взаимодействия с веществом окружающей среды.

В настоящее время такие модели систематически применяются для планирования и анализа результатов экспериментов, которые проводятся на ТШВНС, а также могут быть полезны при проведении аналогичных исследований на других установках.

Новые данные о феноменологических характеристиках излучений от молниевых разрядов, которые были получены на экспериментальном комплексе «Гроза», необходимы для создания современных теорий молнии. Накопленный к настоящему времени практический опыт продолжительной эксплуатации измерительных систем в условиях грозового облака, в непосредственной близости,  $\sim(30\text{--}500)$  м, к пространственной области развития разрядов может оказаться полезным при постановке других подобных экспериментов.

Проводимые на ТШВНС работы по экспериментальному исследованию акустических сигналов сейсмической природы представляют интерес для решения различных задач прикладной геофизики и, в частности, проблемы долгосрочного прогноза землетрясений в сейсмоопасных регионах.

Созданная на ТШВНС база данных и комплекс связанных с нею программ обеспечивают доступ ко всей информации о проводимых здесь экспериментах, как в режиме реального времени, так и для анализа хранящихся в ней архивных данных. Открытый доступ к экспериментальным данным ТШВНС может использоваться для их независимой обработки участниками различных исследовательских групп.

#### **На защиту выносятся:**

1. Аппаратура многоцелевого экспериментального комплекса ТШВНС: детекторы и электронные средства управления процессом измерений для проведения исследований в области физики КЛ, атмосферной физики высоких энергий и геофизики.
2. Программное обеспечение для управления измерениями на различных подсистемах комплекса ТШВНС и обработки результатов этих измерений.
3. Математические методы, использовавшиеся для обработки данных, поступающих от системы детекторов ШАЛ, для расчета плотности потока частиц по этим данным и для восстановления основных параметров ШАЛ, а также ряд реализующих эти методы программ.
4. Совокупность программных моделей, которые строились на основе пакета Geant4 специально для детекторов экспериментального комплекса с учетом

типичных для ТШВНС условий, и результаты модельных расчетов, которые использовались для определения характеристик этих детекторов.

5. Структура информационного комплекса, обеспечивающего хранение всех данных об экспериментах ТШВНС и доступ к этим данным в режиме реального времени со стороны локальных и удаленных пользователей.
6. Данные измерений, которые проводились на различных подсистемах многоцелевого экспериментального комплекса ТШВНС в период его тестовой эксплуатации в 2015–2019 гг. и которые подтверждают корректность вновь разработанных методик, программ и алгоритмов.
7. Ряд новых физических результатов, полученных в период тестовой эксплуатации экспериментального комплекса:
  - функции пространственного распределения потока тепловых нейтронов и мягкого гамма-излучения, сопровождающих прохождение ШАЛ;
  - характеристики мюонной компоненты ШАЛ, принадлежащих к области излома первичного спектра КЛ;
  - временные и энергетические распределения электронов, гамма-, оптического и радио-излучения, генерируемых молниевыми разрядами;
  - данные об особенностях поведения акустических шумов в периоды сейсмической активности в окрестностях ТШВНС.

**Достоверность** информации о ШАЛ, которая была получена на новой системе сбора данных отливной установки ТШВНС, а также корректность предложенной для ее обработки процедуры, обеспечивается положительным результатом сравнения этих данных с известными результатами предыдущих экспериментов. Данные измерений на детекторах системы «Гроза» согласуются с результатами аналогичных публикаций в области перекрытия регистрируемых параметров, а также с выводами ряда теоретических и расчетных работ. Результаты модельных расчетов, выполнявшихся на основе пакета Geant4 для определения характеристик нейтронных детекторов, согласуются в области перекрытия параметров с данными экспериментов, которые проводились на установках КЛ на ТШВНС и на ускорителях в ФИАН и в Протвино. Результаты непрерывного, на протяжении пяти лет, измерения интенсивности нейтронных сигналов с помощью новой системы регистрации на Тянь-Шанском супермониторе 18NM64 соответствуют данным мировой сети по вариациям КЛ.

**Личный вклад** автора заключается в проектировании, монтаже и наладке электронной аппаратуры для детекторов многоцелевого экспериментального комплекса ТШВНС: ливневой установки для регистрации ШАЛ, нейтронных детекторов, мюонных детекторов, детекторов установки «Гроза», а также радио-, оптических и акустических детекторов, предназначенных для экспериментов по геофизической тематике. Все алгоритмы обработки поступающей информации и реализующее их программное обеспечение разрабатывались автором. Окончательный ввод в строй ливневой установки, ее эксплуатация во время тестовых измерений 2015–2019 гг и обработка полученного в этот период материала проводились при определяющем участии автора. По инициативе автора были созданы высотные пункты для проведения исследований, связанных с регистрацией излучения от молниевых разрядов, и он лично обеспечивал проведение этих измерений на протяжении грозовых сезонов 2015–2019 гг. На основе пакета Geant4 автором были построены модели установок и проводилось моделирование процессов регистрации частиц детекторами с учетом специфических особенностей ТШВНС. Автором была разработана база данных для хранения всей информации, полученной в проводимых на ТШВНС экспериментах, и программные интерфейсы для доступа к этой базе внешних пользователей.

**Апробация работы.** Доклады, посвященные поэтапному развитию многоцелевого экспериментального комплекса ТШВНС и результатам, полученным при эксплуатации его отдельных подсистем, представлялись на ряде международных и всероссийских конференций:

- 26th International Cosmic Ray Conference, 1999, Salt Lake City, USA;
- 27th International Cosmic Ray Conference, 2001, Hamburg, Germany;
- 28th International Cosmic Ray Conference, 2003, Tsukuba, Japan;
- 29th Russian Cosmic Ray Conference, 3–7 August 2006, Dubna, Russia;
- 30th International Cosmic Ray Conference, 2007, Merida, Yucatan, México;
- 30th Russian Cosmic Ray Conference, 2–7 July 2008, St. Petersburg, Russia;
- 22nd European Cosmic Ray Symposium, 3–6 August 2010, Turku, Finland;
- 23rd European Cosmic Ray Symposium and 32nd Russian Cosmic Ray Conference, 3–7 July 2012, Moscow, Russia;
- 34th International Cosmic Ray Conference, 2015, The Hague, the Netherlands;

- Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration Conference (TEPA-2016), 3–7 October 2016, Nor Amberd, Armenia;
- ISVHECRI 2016 – XIX International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 22–27 August 2016, Moscow, Russia;
- 10 Years Neutron Monitor Database — NMDB Workshop, 20–23 March 2017, Athens, Greece;
- ISVHECRI 2018 – XX International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 21–25 May 2018, Nagoya, Japan;
- The 26th Extended European Cosmic Ray Symposium (E+CRS 2018) and 35th Russian Cosmic Ray Conference (RCRC 2018), 6–10 July 2018, Barnaul, Russia;
- 2nd Annual Meeting of Kazakh Physical Society, 6–8 June 2019, Almaty, Kazakhstan;
- на III, IV, V и VI Международных школах молодых ученых стран СНГ МФГС в 2016–2019 гг, Алматы, Казахстан и Бишкек, Киргизия.

**Публикации.** Результаты по теме диссертации излагаются в 49 печатных публикациях, 46 из которых были изданы в журналах, рекомендованных ВАК. В базы данных Scopus включены 44 публикации автора, в базы данных Web of Science — 34.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем работы составляет 316 страниц текста, включая 102 рисунка. Список литературы содержит 332 наименования.

## Содержание работы

В **первой главе** диссертации рассматривается ряд невыясненных проблем, для решения которых был предназначен новый комплекс детекторов ТШВНС. Глава начинается с обсуждения текущего состояния исследований КЛ, принадлежащих к энергетическому диапазону ( $10^{14} - 10^{17}$ ) эВ. Открытым вопросом физики КЛ остается происхождение известного излома в их энергетическом спектре при энергии  $E_0 \approx 3 \cdot 10^{15}$  эВ, а также природа других эффектов, которые наблюдаются при взаимодействиях частиц КЛ в этой области энергий: гамма-адронных семейств с «галом» и «выстроенностью» вторичных частиц в рентгенэмульсионных камерах, нарушений скейлинга в форме энергетических

спектров принадлежащих к семействам гамма-квантов, аномалий в распределениях по множественности мюонов, адронной компоненты и испарительных нейтронов ШАЛ и др. Для всех подобных явлений характерна тенденция к их проявлению в исключительно узкой ( $\lesssim 3-5$  м) центральной области ШАЛ, то есть именно там, где концентрируются наиболее энергичные частицы ливня [1]. Другой особенностью этих эффектов является их пороговый характер: они обнаруживаются только во взаимодействиях КЛ достаточно большой энергии, минимум которой, как правило, соответствует положению излома в первичном спектре [2–4]. Отсюда вытекают технические требования, которым должна удовлетворять экспериментальная установка, предназначенная для исследования подобных аномалий: ее детекторы должны быть способны к свободной от насыщения регистрации интенсивных потоков частиц, которые характерны для стволов мощных ШАЛ, а пространственное размещение этих детекторов должно быть достаточно плотным, что необходимо для исследования распределений частиц в центральной области ливня. Помимо этого, такая установка должна обеспечивать возможность регистрации для всех основных компонент ШАЛ: электронно-фотонной, адронной и мюонной, а также для сопровождающих прохождение ШАЛ потоков вторичных частиц — нейтронов и гамма-квантов низкой энергии. По ряду причин наиболее оптимальным вариантом расположения установок подобного рода является высота в пределах (3000–4000) м над уровнем моря. Все эти условия были положены в основу разрабатывавшегося в начале 2000-х годов модернизационного проекта ТШВНС [5–10].

Вплоть до настоящего времени остается до конца невыясненным вопрос о механизме инициации молнии и о той роли, которую в этом процессе могут играть взаимодействия КЛ. Решения этой проблемы можно достичь, исследуя разнообразные излучения, которые генерируются при развитии атмосферных электрических разрядов, для чего оказываются полезными установленные на ТШВНС детекторы частиц. С этой целью на станции была создана специальная система детекторов «Гроза», и накоплен практический опыт непрерывного измерения потоков ускоренных электронов, гамма-квантов, оптического и радиоизлучений во время гроз [11–13].

Другое направление исследований геофизической тематики, подходящим местом для развития которого является ТШВНС, заключается в регистрации упругих колебаний сейсмического происхождения в акустическом диапазоне частот и в поиске временных корреляций между такими сигналами и моментами

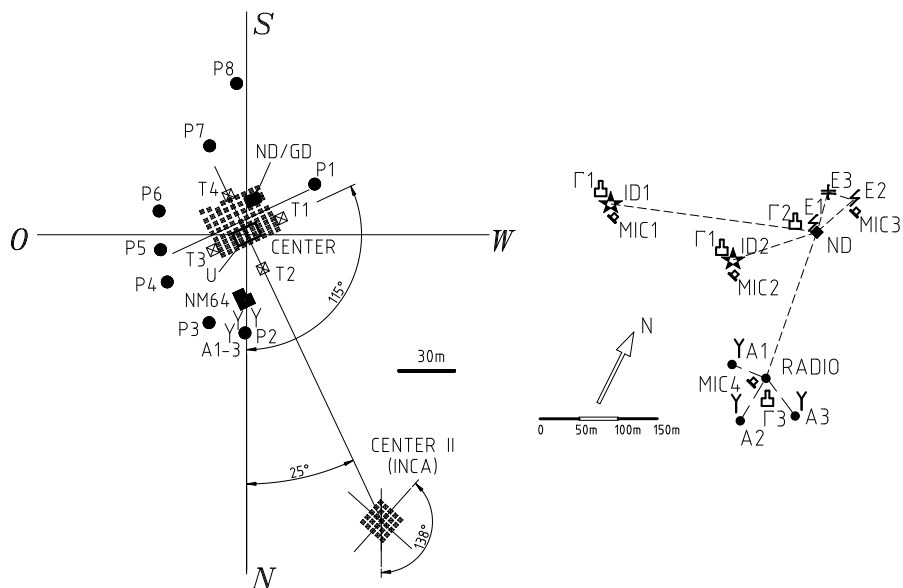


Рис. 1 — Слева: общая схема комплекса ливневых детекторов ТШВНС. Квадратами отмечены сцинтилляционные детекторы заряженных частиц; *CENTER* и *CENTER II* — «ковры» с плотным расположением детекторов; *INCA* — ионизационно-нейтронный калориметр; *NM64* — нейтронный монитор; *ND/GD* — нейтронные и гамма-детекторы с низким порогом; *U* — комплекс подземных детекторов; *A1–A3* — радио-антенны. Справа: система детекторов «Гроза». *ID1* и *ID2* — ионизационные детекторы заряженных частиц; *Г1–Г3* — сцинтилляционные детекторы гамма-излучения; *ND* — нейтронные детекторы; *E1–E3* — датчики электрического поля; *MIC1–MIC4* — микрофоны.

прохождения мощных ШАЛ. Цель этой работы заключается в проверке теории, согласно которой попадание следующих в составе ШАЛ энергичных мюонов в зону разломов земной коры может приводить к образованию микротрещин и к генерации распространяющихся в виде акустической волны упругих колебаний, а также в выяснении перспектив, которые этот эффект мог бы представлять для задач сейсмического прогноза [14, 15].

Завершается первая глава обзором современного состояния комплекса детекторов ТШВНС (см. рисунок 1), который сопровождается описанием личного вклада автора настоящей работы в развитие его отдельных подсистем [16–20].

Предмет второй главы составляют новая ливневая установка ТШВНС — система детекторов заряженных частиц для регистрации электронной компоненты ШАЛ, и методика обработки поступающей от этих детекторов информации [16]. Как показано на рисунке 1, ливневая установка построена вокруг двух центров, *Center* и *Center II*, в каждом из которых детекторы электронов группируются в достаточно плотные «ковры» с суммарной площадью  $\sim 10^3 \text{ м}^2$ . Оба «ковра» полностью перекрывают сверху две системы детекторов, предназначенных для регистрации других компонент ШАЛ: нейтронные, мюонные и гамма-детекторы, которые располагаются в пункте *Center* и в находящемся под ним подземном помещении *U*, и гибридный ионизационно-нейтронный калориметр *INCA* для регистрации адронной компоненты ШАЛ в пункте *Center II*. Общая же площадь, покрытая системой ливневых детекторов на территории ТШВНС, на порядок больше площади плотных «ковров» и составляет  $\sim 10^4 \text{ м}^2$ .

Основу ливневых детекторов образуют сцинтилляторы прямоугольной формы с размерами  $0.5 \times 0.5 \times 0.05 \text{ м}^3$ , состоящие из твердого раствора терфенила в полистироле и работающие в комбинации с фотоэлектронным множителем (ФЭУ). Детектор обеспечивает высокую,  $\sim (90-95)\%$ , эффективность регистрации заряженных частиц по вызываемой ими сцинтилляционной вспышке при незначительной чувствительности к потокам гамма-квантов и коротком, порядка нескольких наносекунд, времени высвечивания сцинтиллятора.

При одновременном прохождении через сцинтиллятор нескольких частиц число попавших на фотокатод ФЭУ сцинтилляционных фотонов определяется суммарным энерговыделением этих частиц в сцинтилляторе. В случае, если мы имеем дело с потоком релятивистских электронов (что соответствует условиям ШАЛ), а ФЭУ работает в линейном режиме, количество прошедших через радиатор частиц, величина их суммарного энерговыделения, амплитуда сцинтилляционного сигнала на фотокатод и амплитуда электрического импульса на выходе ФЭУ оказываются пропорциональными друг другу. Поэтому детекторы данного типа могут использоваться для измерения локальной плотности электронов ШАЛ, а применение системы синхронно работающих сцинтилляторов позволяет измерить пространственное распределение плотности потока частиц ливня.

Общая схема обработки информации, поступающей от ливневой установки, показана на рисунке 2. Принципиальная особенность этой схемы заключается в наличии у каждого детектора двух информационных каналов, высокой (*HS*)



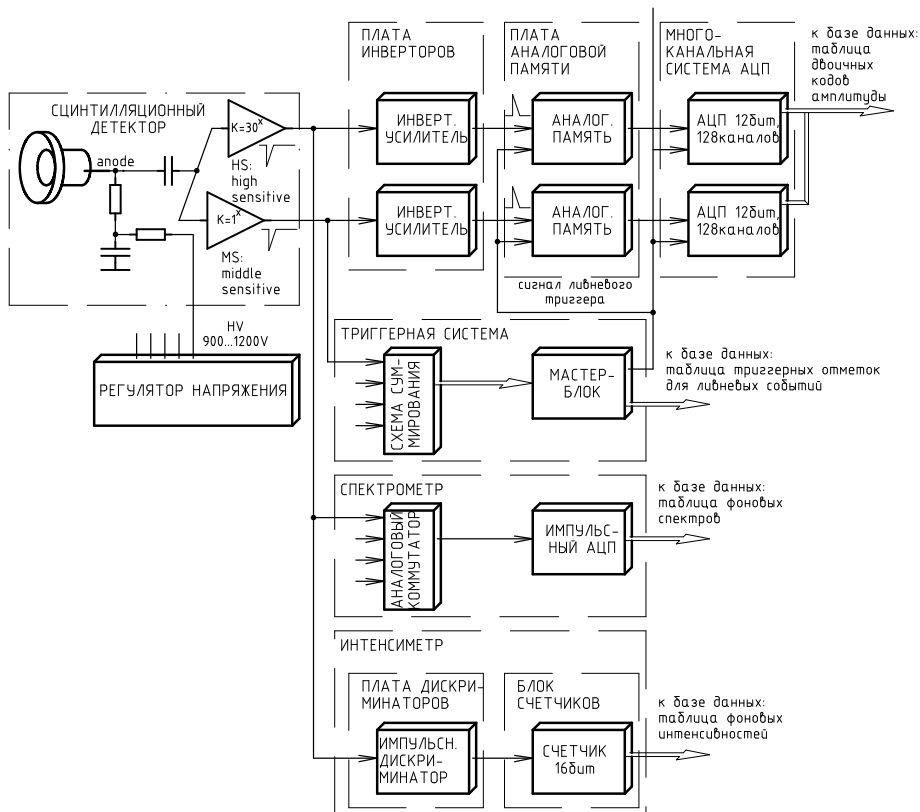


Рис. 2 — Структурная схема процесса обработки данных на ливневой установке ТШВНС.

и средней (*MS*) чувствительности, которые различаются по коэффициенту усиления выходного импульса ФЭУ. Одновременная передача двух аналоговых сигналов от ливневых детекторов обеспечивает расширение их амплитудного диапазона, позволяя регистрировать одним и тем же детектором плотности потока в пределах  $\sim(1 - 10^5)$  частиц/м<sup>2</sup>.

Импульсные сигналы с выхода сцинтилляционных детекторов поступают на многоканальную систему амплитудно-цифрового преобразования (АЦП). Конечным результатом обработки ливневого события является массив двоичных кодов АЦП, несущих информацию о величине сцинтилляционного сигнала, который наблюдался при прохождении ШАЛ в двух амплитудных диапазонах каждого детектора. Положенная в основу системы АЦП модульная структура

обеспечивает хорошую масштабируемость информационной системы: при регистрации события все модули АЦП срабатывают одновременно и независимо друг от друга, чем достигается независимость мертвого времени установки от общего числа информационных каналов. В случае же расширения ливневой установки необходимая модификация системы АЦП производится простым добавлением в нее новых модулей. Помимо системы АЦП, структурная схема на рисунке 2 включает в себя другие узлы, необходимые для корректного функционирования ливневой установки: триггерную систему, которая обеспечивает генерацию управляющего сигнала-триггера в момент прохождения ШАЛ; схему спектрометра, который позволяет периодически измерять амплитудные спектры сцинтилляций у всех детекторов, необходимые для абсолютной калибровки их показаний; и схему интенсиметра для оперативного контроля за качеством работы детекторов по скорости счета их фоновых сигналов.

Для проведения измерений на ливневой установке был разработан комплекс специальных программ, в основу которого положен принцип разделения необходимых функций между отдельными программными модулями, каждый из которых несет ответственность за решение одной ограниченной задачи. Как правило, перечень базовых задач включает в себя управление экспериментальной установкой в реальном времени в процессе измерений; экспресс-диагностику текущего состояния всех детекторов установки; сбор и загрузку в базу данных поступающей информации; доступ к хранящимся в базе данным, их визуализацию и обработку в режиме off-line. Ко всей сохраненной информации, а также к текущим данным экспресс-диагностики возможен доступ по сети Интернет. Такая структура информационной системы характерна для всех установок, которые разрабатывались для нового экспериментального комплекса ТШВНС.

Процедура off-line обработки поступающей от ливневой установки информации заключается в вычислении значений плотности потока заряженных частиц ШАЛ  $\rho_D$  в пунктах расположения детекторов  $D$ . В свою очередь, на основе пространственного распределения (ПР) этой плотности можно оценить основные параметры ШАЛ: его размер (суммарное количество заряженных частиц)  $N_e$ , «возраст»  $s$  и координаты оси ливня  $X_0$  и  $Y_0$ . Такая оценка делается путем аппроксимации распределения  $\rho_D(x,y)$  функцией Нишимуры-Каматы-Грейзена  $\rho_{NKG}(x,y|N_e, s, X_0, Y_0)$ . Полученная в результате аппроксимации совокупность значений  $(N_e, s, X_0, Y_0)$  и принимается за оценку основных параметров данного ШАЛ. Качество разработанных для решения этой задачи

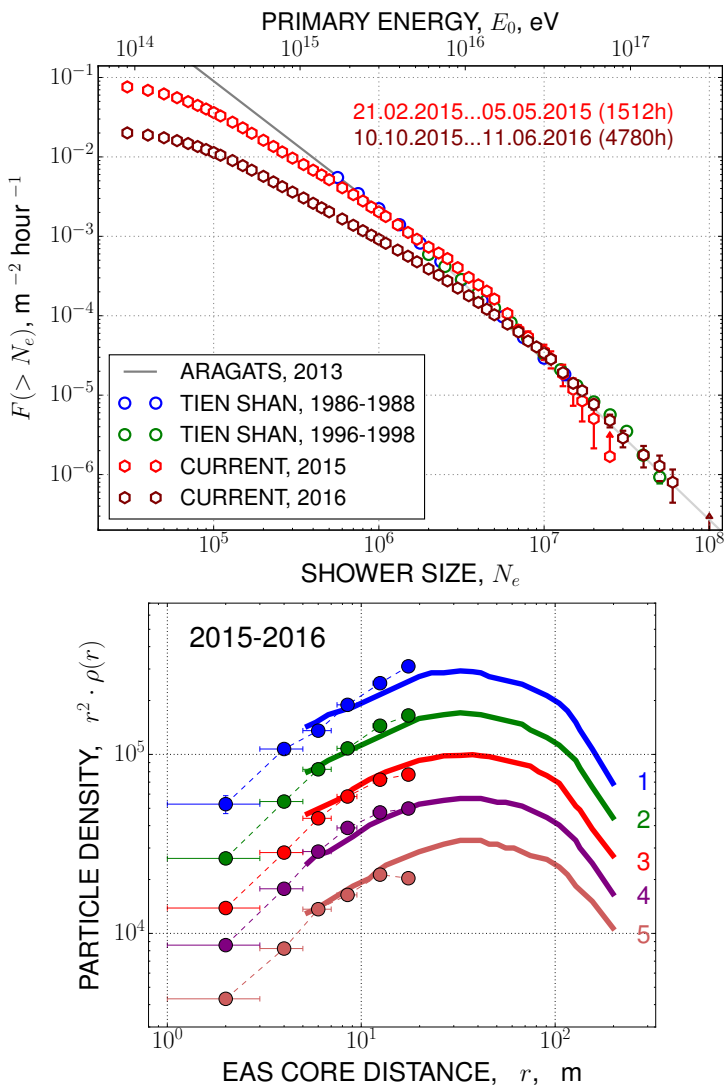


Рис. 3 — Результаты регистрации ШАЛ: спектры ливней по числу частиц  $N_e$  (слева) и усредненные пространственные распределения плотности потока частиц в ШАЛ с  $N_e \sim 7.2 \cdot 10^6$  (1),  $N_e \sim 4.0 \cdot 10^6$  (2),  $N_e \sim 2.3 \cdot 10^6$  (3),  $N_e \sim 1.3 \cdot 10^6$  (4) и  $N_e \sim 7.3 \cdot 10^5$  (5) по измерениям, проводившимся на ТШВНС в 1986–1989 гг (сплошные линии) и на новой установке в 2015–2016 гг (точки).

алгоритмов проверялось путем сравнения с известными результатами прежних экспериментов результирующего распределения ливней по  $N_e$  и по  $s$ , усредненных ПР ливневых частиц и прочих характеристик ШАЛ, которые измерялись в период тестовой эксплуатации установки в 2015–2016 гг. Как пример такого сравнения на верхнем графике рисунка 3 показаны спектры зарегистрированных ШАЛ по числу частиц  $N_e$ . Как следует из этого графика, в области достаточно больших ШАЛ,  $N_e \gtrsim (10^6 - 10^7)$ , для которых несущественно влияние порога триггерной системы, полученные в 2015–2016 гг спектры оказываются совпадающими по своему наклону и интенсивности с данными предшествующих экспериментов. На нижнем графике рисунка 3, где усредненные ПР ливней, зарегистрированных на новой установке, показаны в сравнении с результатами прежних измерений, видно хорошее согласие между двумя наборами данных в области их перекрытия. Таким образом, вновь созданные аппаратура и методика обработки данных Тянь-Шаньской ливневой установки способны давать адекватные результаты относительно основных характеристик ШАЛ.

Нейтронные детекторы и связанная с ними методика регистрации адронной компоненты КЛ составляют предмет третьей главы. Развитие системы таких детекторов на ТШВНС начиналось с нейтронного монитора NM64, который был установлен здесь в 1970-х годах и с тех пор непрерывно используется в качестве одной из составляющих мировой сети наблюдения за вариациями КЛ [21]. Начиная с середины 1990-х годов этот монитор был включен в состав ливневой установки в качестве детектора адронов ШАЛ [2]. Главным образом такой детектор чувствителен к потоку высокоэнергичных адронов КЛ ( $E_h \gtrsim (500 - 1000) \text{ МэВ}$ ), которые способны к генерации значительного числа испарительных нейтронов при их взаимодействии с веществом находящейся *внутри* монитора тяжелой мишени-поглотителя. Чувствительным элементом монитора являются газоразрядные счетчики, в состав наполнения которых входит обогащенный газ  $^{10}\text{BF}_3$ , так что регистрация тепловых нейтронов происходит за счет реакции  $n(^{10}\text{B}, ^7\text{Li})\alpha$ . Таким образом, регистрация адронной компоненты КЛ сводится к определению числа импульсных сигналов, поступивших от счетчиков монитора в течение некоторого времени после взаимодействия. Поскольку с технической точки зрения такой подсчет реализовать гораздо проще, чем амплитудные измерения аналоговых сигналов, нейтронная методика может обеспечить широкий динамический диапазон измерения плотности адронов на одном и том же детекторе.

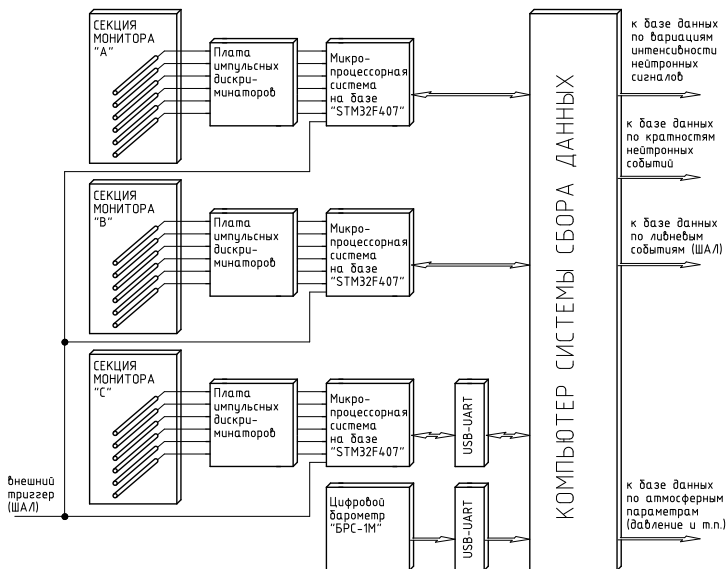


Рис. 4 — Схема системы сбора данных на нейтронном мониторе ТШВНС.

Современный подход к построению системы сбора данных от нейтронных детекторов иллюстрируется рисунком 4 на примере вновь разработанной на ТШВНС электроники для нейтронного монитора НМ64 [22]. Каждая из трех секций этого монитора обслуживается отдельным электронным блоком, включающим в себя набор дискриминаторов для формирования импульсных сигналов от шести счетчиков секции и автономную подсистему сбора данных, которая построена на базе 32-разрядного микроконтроллера STM32F407. Встроенная программа микроконтроллера выполняет все необходимые функции по регистрации нейтронных сигналов, а ее результаты по последовательным линиям связи передаются центральному компьютеру, который обеспечивает общее управление измерениями и сохранение поступающей информации в базе данных ТШВНС.

Возможность применения нейтронных детекторов для регистрации адронов КЛ вытекает из того факта, что средняя множественность испарительных нейтронов, которые образуются при взаимодействии частиц КЛ с веществом, так же как и пропорциональное ей число зарегистрированных сигналов от нейтронных счетчиков  $M$ , связаны функциональной зависимостью с энергией адронного взаимодействия  $E_n$ <sup>21</sup>. Конкретный вид зависимости  $E_n(M)$  можно получить

<sup>21</sup>Shen M. L. Suppl. Nuovo Cimento. — VI, 1177 (1968).

расчетным путем, для чего на основе программного пакета Geant4 была разработана модель, позволяющая учесть специфические особенности проводимых на ТШВНС экспериментов [23]. Перечень физических моделей взаимодействия частиц из пакета Geant4, которые использовались в этих расчетах, включает в себя электромагнитные процессы, адронную физику и процессы взаимодействия мюонов. Все реакции, происходящие с участием нейтронов, рассматривались в широком диапазоне энергий, от тепловых и вплоть до десятков ГэВ, что обусловлено необходимостью учесть как взаимодействия частиц КЛ, обладающих энергией порядка (100–1000) ТэВ, так и реакции вторичных частиц-продуктов низкой энергии. Комбинация такой модели взаимодействий с геометрической моделью нейтронного монитора позволила определить вид зависимости  $E_h \approx 0.49 \cdot M^{1.8}$  (для области  $E_h = (1 - 10^4)$  ГэВ), учесть вклад в регистрируемый монитором сигнал со стороны фоновых нейтронов низкой энергии из окружающей среды, а также провести сравнение результатов расчета с известными экспериментальными данными, подтверждающее корректность примененной совокупности моделей [24, 25]. Некоторые результаты проведенных расчетов представлены на графиках рисунка 5.

В заключение третьей главы, как иллюстрация эффективности использования нейтронной методики для изучения адронов КЛ, приводится обзор ряда нетривиальных данных относительно адронной компоненты ШАЛ, которые были получены в экспериментах с нейтронным монитором ТШВНС [2, 3, 26], и обсуждаются перспективы дальнейшего исследования этих эффектов на основе разработанных к настоящему времени новых методов регистрации нейтронов [6, 7].

**Четвертая глава** диссертации посвящена свойствам нейтронных детекторов с низким энергетическим порогом, которые размещались на ТШВНС начиная с середины 2000-х годов. В отличие от монитора, эти детекторы не имеют внутренней тяжелой мишени, что делает их чувствительными к потоку нейтронов, которые генерируются при взаимодействиях адронов КЛ *вне* детектора, и замедляются в окружающей его среде до тепловых значений кинетической энергии. Чтобы добиться чувствительности детектора к нейтронам более высокой энергии (вплоть до нескольких МэВ), часть входящих в него нейтронных счетчиков может быть окружена слоем замедлителя из легкого вещества. Так как процесс распространения нейтронов во внешней среде должен неизбежно сопровождаться гамма-излучением МэВ-ных энергий, которое генерируется при

захвате замедлившихся нейтронов ядрами окружающего вещества, в состав экспериментального комплекса можно ввести дополнительные детекторы мягкого гамма-излучения [3, 4].

В событиях ШАЛ большое количество нейтронов образуется при взаимодействиях входящих в состав ливня адронов с веществом окружающей среды. Впоследствии эти нейтроны термализуются и в течение какого-то времени,  $\sim(1-10)$  мс после прохождения основного фронта релятивистских частиц ШАЛ, диффундируют в среде. Регистрация сигнала от таких замедлившихся нейтронов и исследование их характеристик (множественности, пространственного распределения и т. п.) может дать ценную информацию о свойствах адронных взаимодействий при высоких энергиях<sup>22,23</sup>.

Очевидно, что существенное влияние на характеристики лишенного внутренней мишени нейтронного детектора должны оказывать параметры окружающей его среды, в которой происходит генерация и распространение регистрируемых нейтронов. Поэтому при анализе получаемых сигналов такого детектора следует учитывать свойства его внешнего окружения. Необходимую для этой цели информацию можно получить, сочетая упомянутую выше модель физических взаимодействий Geant4 с геометрическими моделями, описывающими как сами детекторы, так и элементы их типичного окружения на ТШВНС: внешнего замедлителя нейтронов, стен помещения, грунта и т. п. объектов. Соответствующие расчеты и полученные в их результате параметры для определения потока нейтронов, электронов и гамма-излучения, сопровождающих прохождение ШАЛ, составляют предмет нескольких разделов главы 4. Примеры таких результатов показаны на графиках в нижнем ряду рисунка 5.

Как иллюстрация возможностей нейтронной методики, в заключение четвертой главы приводится обзор новых данных, которые были получены при эксплуатации многоцелевого экспериментального комплекса ТШВНС в 2016–2019 гг [4]. Здесь представлен ряд нетривиальных результатов относительно нейтронного сопровождения мощных ливней и связанных с такими ШАЛ потоков мягкого гамма-излучения, которые также можно рассматривать как результат захвата замедлившихся нейтронов ядрами атомов окружающей среды. Отмечено, что полученные данные представляют интерес для уточнения модели

---

<sup>22</sup>Щеголев О. Б., Диссертация ... к. ф.-м. н., ИЯИ РАН Москва (2016).

<sup>23</sup>Bartoli B. et al., *Astropart. Phys.* **81**, 49 (2016).

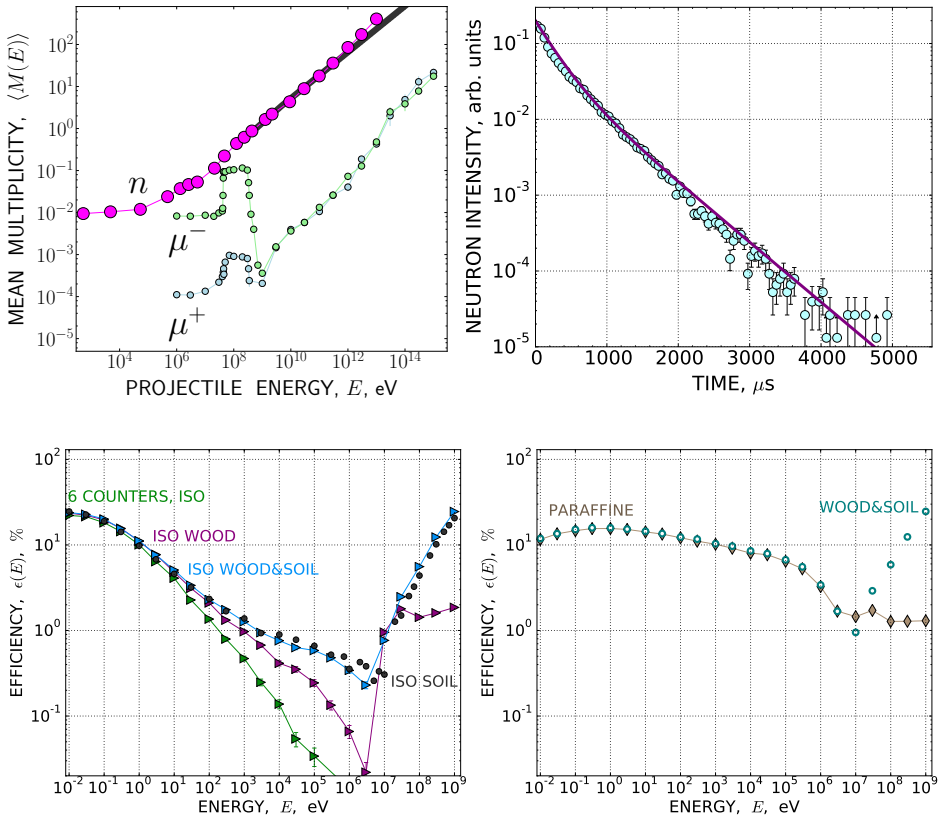


Рис. 5 — Результаты модельных расчетов Geant4 для нейтронных детекторов ТШВНС. Вверху слева: суммарная множественность сигналов от счетчиков нейтронного монитора  $M$  в зависимости от энергии  $E$  первичных частиц — нейтронов и мюонов. Вверху справа: распределение во времени сигналов от испарительных нейтронов, образованных в результате ядерного взаимодействия в мониторе. Точки — расчет Geant4, гладкие линии — измерения на нейтронном мониторе ТШВНС. Внизу: вероятность регистрации нейтронов низкопороговым детектором на шести газоразрядных нейтронных счетчиках в зависимости от энергии нейтрона  $E$  (эффективность детектора  $\epsilon(E)$ ), рассчитанная с учетом влияния со стороны деревянных стен (*WOOD*) и грунта (*SOIL*), и эффективность нейтронного счетчика, окруженного дополнительным замедлителем нейтронов из легкого вещества (*PARAFFINE*).



взаимодействия энергичных адронов ШАЛ, в которых образуются регистрируемые нейтроны, а для их адекватного объяснения требуется продолжение подобных исследований.

**Пятая глава** посвящена применению нейтронных детекторов в качестве средства для регистрации энергичных мюонов КЛ. Здесь представлены результаты модельного расчета множественности нейтронных событий, которых следовало бы ожидать в результате взаимодействия частиц КЛ в подземном нейтронном детекторе ТШВНС. Конструкция этого детектора аналогична внутреннему устройству нейтронного монитора НМ64, а сам он находится в подземном помещении станции под слоем скального поглотителя толщиной 2000 г/см<sup>2</sup> [27, 28]. В расчет были заложены спектр энерговыделений проникающей компоненты КЛ, который измерялся на ТШВНС в 1960-х гг в экспериментах с подземным ионизационным калориметром<sup>24,25</sup>, спектр множественности нейтронных событий, наблюдавшихся на подземном мониторе в 2004–2007 гг [29], и разработанная на основе пакета Geant4 модель взаимодействия частиц с веществом в типичных условиях ТШВНС. В результате расчетов показано, что подземный монитор ТШВНС может использоваться как эффективный детектор мюонов с энергией  $E > 5$  ГэВ. В качестве примера таких результатов на левом верхнем графике рисунка 5 показана зависимость средней множественности нейтронных сигналов от энергии для положительного и отрицательного мюонов, попавших в этот детектор.

Далее в пятой главе представлен ряд новых данных, которые были получены в 2015–2019 гг при совместной работе ливневой установки ТШВНС и подземного нейтронного детектора в экспериментах по регистрации мюонного сопровождения ШАЛ [30]. Эти данные демонстрируют перспективность дальнейшего развития и использования такой методики для изучения характеристик мюонной компоненты ШАЛ.

Предмет **шестой главы** составляют приложения разработанной на ТШВНС экспериментальной техники к проблемам геофизической тематики. Здесь рассмотрены регистрация потоков различного типа излучений от атмосферных электрических разрядов, информация о которых могла бы быть полезной в разработке современных теорий развития молнии, и поиск сейсмических сигналов от глубинных литосферных процессов. В обоих случаях особое

---

<sup>24</sup>Erlykin A. D. et al., Acta Phys. Acad. Sci. Hung. **29(4)**, 133 (1970).

<sup>25</sup>Ерлыкин А. Д., Диссертация ... к. ф.-м. н., ФИАН Москва (1966).

внимание уделяется выяснению той роли, которую взаимодействия КЛ могли бы играть в развитии рассматриваемых эффектов.

Глава начинается с описания модельного расчета, который проводился на основе пакета Geant4, и целью которого было выяснение характерных особенностей излучений, которые генерируются при развитии электрических разрядов в грозовых облаках. В расчетах рассматривалась задача о развитии электронно-фотонной лавины в атмосферном электрическом поле для конкретных условий Тянь-Шаньской высокогорной станции [31]. Согласно результатам моделирования, в силу ограниченного пробега и существенной анизотропии углового распределения образующихся электронов и гамма-квантов, оптимальный для их регистрации вариант соответствует положению детектора на небольшом расстоянии,  $\lesssim (1-2)$  км, от пространственной области разряда. Исходя из этих соображений, в состав Тянь-Шаньского экспериментального комплекса были включены специальные высотные пункты размещения детекторов — сцинтилляторов, которые служат для регистрации гамма-излучения, и детекторов заряженных частиц. Эти детекторы располагаются на высоте (400–700) м над средним уровнем станции и во время гроз могут с большей вероятностью оказаться погруженными в глубину грозового облака.

В свою очередь, такое размещение детекторов выдвигает ряд специфических требований к организации измерений, которые должны вестись под воздействием исключительно высоких электрических помех со стороны близких молниевых разрядов. Как показывает практический опыт, во время грозы питание всей аппаратуры на высотном пункте должно производиться от местного аккумуляторного источника. Источник питания, детектор и вся обслуживающая его работу электроника должны компактно размещаться в замкнутом, электрически экранированном объеме. Требованиям компактности и низкого энергопотребления удовлетворяют малогабаритные системы сбора данных на базе микроконтроллеров STM32F407, которые изначально разрабатывались для нейтронных детекторов ТШВНС ([22], см. выше), но могут применяться и на «грозовых» высотных пунктах для обслуживания детекторов частиц — ускоренных электронов и гамма-квантов. Наряду с такими детекторами на высотных пунктах используются датчики оптического и радио-излучений от молний, измерители электрического поля, приемники низкочастотных (ОНЧ и СНЧ) электромагнитных колебаний, микрофоны и другая аппаратура, съем информации с которой сводится к оцифровке аналогового выходного сигнала

с временным разрешением в пределах  $\simeq(10-1000)$  мкс. Для этой цели можно применить встроенные 12-разрядные АЦП микроконтроллеров STM32F407, программа управления которыми в этом случае модифицируется соответствующим образом. Помимо таких контроллеров, для управления рядом установок на ТШВНС были разработаны миниатюрные системы сбора данных на базе микропроцессоров, обладающие компактностью, низким энергопотреблением, и способностью к эффективной обработке цифровых и аналоговых сигналов в реальном масштабе времени. Эффективность вновь созданных аппаратных средств была продемонстрирована в измерениях потока гамма-лучей [32–38], заряженных частиц [39–42] и нейтронов [43–45], проводившихся на ТШВНС при молниевых разрядах во время гроз. Иллюстрацией подобных результатов служат приведенные на рисунке 6 данные экспериментов по синхронной регистрации излучения молний в различных диапазонах электромагнитного спектра [46] и наблюдения предваряющего молниевый разряд события TGE (thunderstorm gamma enhancement)<sup>26</sup> и кратковременной вспышки жесткого излучения непосредственно в момент инициации молнии<sup>27</sup>.

Помимо расчетов, которые проводились в связи с экспериментальной деятельностью в области атмосферного электричества на ТШВНС, созданные в ходе выполнения настоящей работы программы моделирования использовались для определения эффективности детекторов эксперимента ERG по исследованию излучений от высоковольтных электрических разрядов в лабораторных условиях ФИАН [47].

Компактная аппаратура для управления разнообразными системами физических детекторов, которая в последние годы создавалась на ТШВНС, находит себе применение также и при изучении процессов сейсмической активности в окружающем станцию регионе. Как иллюстрация практической эффективности вновь созданных для этой цели детекторов и методики обработки поступающих от них данных, в шестой главе представлены результаты непрерывного мониторинга интенсивности мягкого гамма-излучения и уровня акустических шумов, которые проводились на глубине 50 м ниже поверхности грунта в скважине, пробуренной на территории ТШВНС. Согласно этим данным, в ряде случаев наблюдались существенные отклонения регистрируемых параметров от их

---

<sup>26</sup>Chilingarian A. et al., Phys. Rev. D. **83**, 062001 (2011).

<sup>27</sup>Wada Y. et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 061103 (2019).

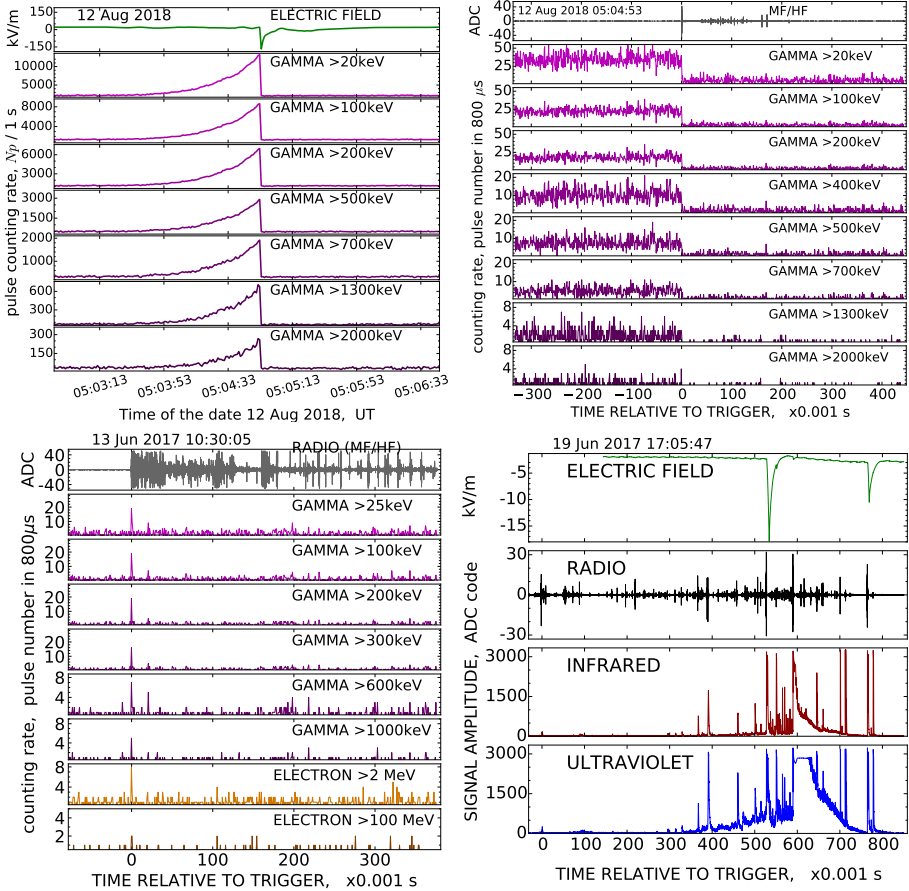


Рис. 6 — Данные по излучениям молниевых разрядов, полученные на расстоянии  $\lesssim 100$  м от пространственной области разряда.

Вверху: интенсивность гамма-излучения (*GAMMA*) во время события TGE, измерения с разрешением 1 с и 800 мкс. Внизу: короткий выброс жестких гамма-лучей и электронов в момент инициации молнии (слева) и синхронная запись сигналов от детекторов электромагнитного излучения молнии в диапазонах длин волн 100–500 м (*RADIO*), 240–380 нм (*ULTRAVIOLET*), 610–800 нм (*INFRARED*), а также от датчика электрического поля (*ELECTRIC FIELD*).

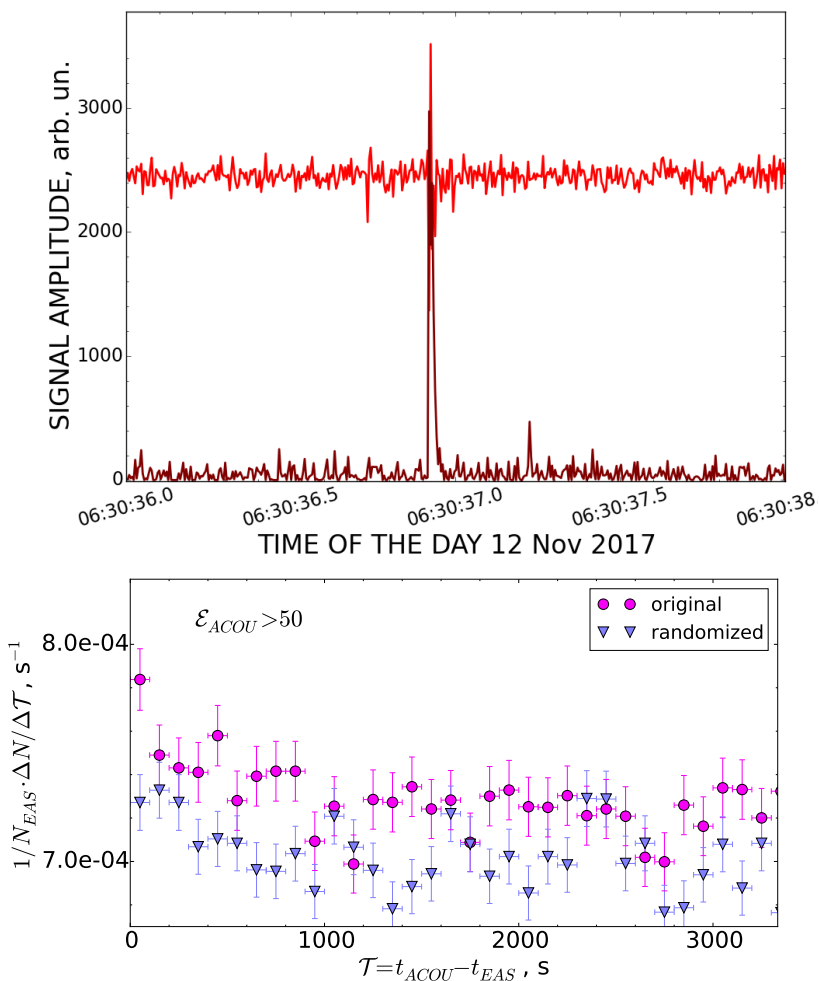


Рис. 7 — Вверху: кратковременный выброс интенсивности в записях сигналов акустического детектора. Верхний график — сигнал микрофона, нижний график — его низкочастотная огибающая. Данные непрерывного мониторинга уровня акустических сигналов на глубине 50 м с временным разрешением 2 мс.

Внизу: распределения временных задержек  $T$  (в секундах) между акустическими выбросами и предшествующими им ШАЛ (кружки), а также такими выбросами и случайными моментами времени (квадраты). Видно статистически значимое превышение частоты акустических сигналов над фоном случайных совпадений в области  $T \leq 100$  с.

обычного поведения в течение достаточно продолжительных (от десятков часов до нескольких суток) временных периодов, как предшествующих, так и последующих моментам близких землетрясений. Эти наблюдения подтверждают возможность применения рассматриваемых детекторов для задач, связанных с исследованием сейсмических процессов, и для целей сейсмического прогноза.

Еще одним подтверждением такой возможности служат положительные результаты эксперимента по синхронизированному с регистрацией ШАЛ поиску сигналов от упругих волн сейсмического происхождения в акустическом диапазоне частот, который проводился во время эксплуатации новой ливневой установки в 2016–2019 гг [48, 49]. Как выяснилось в ходе этого эксперимента, на фоне в целом достаточно равномерных записей уровня акустических шумов в подземной скважине могут наблюдаться нерегулярные кратковременные выбросы их амплитуды. Типичный пример таких событий, частота которых может варьировать в широких пределах, от 0 до  $\sim 100$  событий/сутки, показан на рисунке 7. В завершение шестой главы диссертации обсуждается обнаруженная в этом эксперименте статистически значимая корреляция между моментами наблюдения подобных выбросов и предшествующими им случаями прохождения мощных ШАЛ (см. рисунок 7, нижний график). Этот результат дает основание связать такие сигналы с процессами образования микротрещин, триггером для которых могло бы служить попадание частиц проникающей компоненты ШАЛ в механически напряженную среду горных пород расположенного в окрестностях ТШВНС разлома земной коры. При подтверждении этих результатов, дальнейшие исследования корреляций между акустическими шумами и прохождениями ШАЛ представляют несомненный интерес как источник необходимой для оперативного прогноза землетрясений информации о состоянии глубинных разломов.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты выполненной работы:

1. К настоящему времени на ТШВНС создан многоцелевой экспериментальный комплекс, который не имеет аналогов в мировом масштабе по своей информативности, высокогорному расположению, набору применяемых детекторов и развитой инфраструктуре.
  - Создана новая система детекторов для регистрации частиц заряженной компоненты ШАЛ (ливневая установка). Основные характеристики новой системы — динамический диапазон измеряемых значений плотности потока частиц  $\sim 10^5$ , с возможностью его расширения вплоть до  $(1 - 2) \cdot 10^6$ ;

до  $\sim 10^4$  независимых информационных каналов; не зависящее от количества подключенных детекторов время обработки ливневых событий, — полностью отвечают поставленной задаче исследования стволов ШАЛ с первичной энергией ( $10^{14} - 10^{17}$ ) эВ. Достигнута высокая безотказность ливневой установки: отношение полезного времени ее работы к астрономическому составляет не менее 99%.

- Созданные в составе экспериментального комплекса ТШВНС подсистемы нейтронных детекторов применялись для измерения параметров адронной компоненты ШАЛ в широком диапазоне энергий: начиная от энергии тепловых нейтронов и вплоть до энергий порядка (100–1000) ГэВ. Специальные детекторы для регистрации нейтронов, которые образуются при взаимодействиях мюонов, использовались для изучения характеристик мюонной компоненты КЛ с энергетическим порогом 5 ГэВ.
- В состав экспериментального комплекса были включены гамма-детекторы с низким энергетическим порогом, которые применялись для регистрации мягкого, (30–3000) кэВ, гамма-излучения, сопровождающего прохождение стволов ШАЛ. Это открывает еще один канал для получения информации о свойствах адронной компоненты ШАЛ.
- Для проведения экспериментов в области атмосферной физики высоких энергий созданы высотные пункты размещения детекторов. В пунктах установлены детекторы для регистрации электронов, ускоренных до (3–100) МэВ, и детекторы излучения молний в гамма (20–3000 кэВ), ультрафиолетовом (200–400 нм) и инфракрасном (600–800 нм) диапазонах спектра, а также приемники электромагнитных волн в частотных диапазонах (0.1–10) МГц, (1–10) кГц и (1–100) Гц. Для обслуживания этих детекторов созданы специальные электронные системы, приспособленные к автономной работе в условиях грозового облака и в непосредственной близости (десятки и сотни метров) к молниевым разрядам.
- Создана система детекторов для работы с сигналами сейсмического происхождения. Эта система включает в себя установленные в подземной скважине акустические приемники на основе высокочувствительных микрофонов, нейтронные и гамма-детекторы, а также специализированную аппаратуру для приема и обработки их сигналов.

Вся разработанная для различных подсистем многоцелевого комплекса ТШВНС 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.

2. Разработаны программы для оперативного управления всеми подсистемами экспериментального комплекса в процессе измерений, а также для приема, обработки и хранения поступающей информации с возможностью удаленного доступа к этим данным в реальном времени по сети Интернет. Все разработки программного обеспечения базируются на современных свободных программных средствах с открытым исходным кодом.
3. Для новой ливневой установки ТШВНС полностью отработана методика определения по ее исходным данным (кодам АЦП) основных параметров ШАЛ: положения оси ливня, его «возраста»  $s$ , числа заряженных частиц в ливне  $N_e$  и первичной энергии  $E_0$ . Все необходимые для этой цели алгоритмы реализованы в соответствующих программах. Список таких алгоритмов включает в себя:
  - пересчет кодов АЦП, зарегистрированных в двух амплитудных диапазонах, к единой амплитуде сигнала в детекторах ливневой установки;
  - переход от амплитуды сигнала к значениям плотности потока частиц в каждом детекторе с учетом его индивидуальной калибровки;
  - определение параметров ШАЛ на основе пространственного распределения этой плотности.
4. На основе пакета Geant4 разработаны программные модели детекторов и характерных для ТШВНС объектов окружающей среды. Все эти модели были протестированы путем сравнения расчетных результатов с известными из эксперимента данными. Модели использовались для определения условий работы детекторов ТШВНС в следующих расчетах:
  - ожидаемого сигнала от нейтронного монитора НМ64 при попадании в него энергичных адронов КЛ;



- вероятности регистрации (эффективности детектора) нейтронов и гамма-квантов детекторами различного типа;
  - влияния со стороны объектов внешней среды на процесс регистрации нейтронов, принадлежащих к различным энергетическим диапазонам;
  - потока частиц различного типа в подземном помещении ТШВНС и обоснования возможности применения установленных в этом помещении нейтронных детекторов для регистрации мюонов КЛ;
  - ожидаемых характеристик сигнала от детекторов частиц при регистрации ими излучения электронно-фотонных лавин, развивающихся в атмосферном электрическом поле, для конкретных условий ТШВНС.
5. Для хранения всей полученной в экспериментах ТШВНС информации создана система взаимосвязанных баз данных и программных интерфейсов, обеспечивающих доступ к этой информации внешним пользователям в режиме реального времени. В основу информационного комплекса ТШВНС положена современная система управления реляционными базами данных Postgres с открытым исходным кодом.
  6. Работа новых подсистем многоцелевого экспериментального комплекса была проверена во время его тестовой эксплуатации в 2015–2019 гг. В течение этого периода на новой установке были измерены спектр регистрируемых ШАЛ по числу частиц, распределения ШАЛ по параметру «возраста», функции пространственного распределения заряженной компоненты ШАЛ и сопровождающих прохождение ШАЛ тепловых нейтронов. В области перекрытия параметров все эти характеристики согласуются как с результатами аналогичных экспериментов, проводившихся ранее на ТШВНС, так и с данными других исследовательских групп, а также с результатами модельных расчетов. Такое согласие служит подтверждением корректности вновь разработанных методик и алгоритмов.
  7. На протяжении периода тестовой эксплуатации был получен ряд новых физических результатов:
    - Измерены функции пространственного распределения плотности потока тепловых нейтронов и мягкого, (30–3000) кэВ, гамма-излучения, сопровождающих прохождение ШАЛ. Обнаружено, что такие распределения имеют экспоненциальный вид, форма которого существенно изменяется у ливней

с энергией  $E_0 \approx 3 \cdot 10^{15}$  эВ, то есть в точке излома первичного спектра КЛ. Соответствующие этим распределениям зависимости интегрального флюенса нейтронов и гамма-квантов от энергии ШАЛ,  $F_n(E_0)$  и  $F_\gamma(E_0)$ , также меняют свою форму в точке излома.

- При регистрации мюонной компоненты ШАЛ с энергетическим порогом 5 ГэВ обнаружено, что зависимость множественности таких мюонов от энергии ливня  $N_\mu(E_0)$  меняет свой вид в области излома первичного спектра, при  $E_0 \approx 3 \cdot 10^{15}$  эВ. Также наблюдались ливневые события с аномально большой задержкой мюонного сигнала,  $\simeq(100\text{--}1000)$  мкс, относительно общего фронта ливневых частиц.
- На находящихся в глубине грозового облака высотных пунктах были получены временные распределения интенсивности и распределения по энергиям для потоков ускоренных электронов (с энергиями  $\geq 2$  МэВ и  $\geq(80\text{--}100)$  МэВ) и гамма-квантов (в диапазоне (20–3000) кэВ), которые регистрировались на расстоянии  $\sim(50\text{--}100)$  м от молниевых разрядов в событиях, относящихся к различным типам грозовой активности.
- В экспериментах по синхронной регистрации излучения от молний в радио-, оптическом и гамма-диапазонах электромагнитного спектра были обнаружены различные типы электрических разрядов, существенно отличающиеся по своему временному поведению: короткие импульсы с длительностью  $\lesssim 1$  мс и длительные непрерывные разряды с продолжительностью (300–500) мс. Наблюдались события с различными особенностями в спектре излучений: кратковременные ( $\lesssim 100$  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.
- При непрерывном мониторинге акустических шумов в частотном диапазоне (0.5–10) кГц обнаружены характерные особенности их поведения, сопровождающие подготовительный период близких землетрясений. В экспериментах по синхронной регистрации акустических шумов и ШАЛ получены указания на существование статистически значимых корреляций между акустическими сигналами и прохождением проникающих частиц

КЛ. Эти результаты представляются перспективными для задач долгосрочного прогноза сейсмической активности и предсказания землетрясений.

## Список публикаций по теме диссертации

1. *Shaulov S. B., ... , Shepetov A. L., et al.* Investigation of EAS cores // *EPJ Web of Conf.* — 2017. — V. 145. — P. 17001.
2. *Chubenko A. P., ... , Shepetov A. L., et al.* Anomalous time structure of extensive air shower particle flows in the knee region of primary cosmic ray spectrum // *J. Phys. G.* — 2002. — V. 28. — № 2. — P. 251–266.
3. *Chubenko A. P., Shepetov A. L., et al.* The influence of background radiation on the events registered in a neutron monitor at mountain heights // *J. Phys. G.* — 2008. — V. 35. — P. 085202.
4. *Shepetov A. L., et al.* Measurements of the low energy neutron and gamma ray accompaniment of extensive air showers in the knee region of primary cosmic ray spectrum // *Eur. J. of Phys. Plus* — 2020. V. 135. — P. 96. — arXiv:1912.13173 [astro-ph.HE].
5. *Chubenko A. P., ... , Shepetov A. L., et al.* New complex installation ATHLET for the investigation of interactions in ultrarays on Tien-Shan mountain // *Nucl. Instrum. Methods A.* — 2004. — V. 527. — № 3. — P. 648–651.
6. *Britvich G. I., ... , Shepetov A. L., et al.* A neutron detector on the basis of a boron-containing plastic scintillator // *Nucl. Instrum. Methods A.* — 2005. — V. 550. — № 1–2. — P. 343–358.
7. *Chubenko A. P., Shepetov A. L., et al.* The effect of anomalous neutron events: new data from the scintillation neutron detectors // *Proceedings of the 30th ICRC.* — V. 4 (HE-1). — México City, México. — 2008. — P. 7–10.
8. *Britvich G. I., ... , Shepetov A. L., et al.* The large scintillation charged particles detector of the Tien-Shan complex 'ATHLET' // *Nucl. Instrum. Methods A.* — 2006. — V. 564. — № 1. — P. 225–234.
9. *Ammosov V. V., ... , Shepetov A. L., et al.* Modern concept of the INCA project elements // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. — 2006. — V. 151. — P. 426–429.

10. Chubenko A. P., Shepetov A. L., et al. Current state of the ATHLET set-up at the Tien-Shan // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. — 2006. — V. 151. — P. 422–424.
11. Чубенко А. П., Щенетов А. Л., и др. Изучение взаимосвязи процессов в грозовой атмосфере с высокоэнергичными космическими лучами на Тянь-Шаньском экспериментальном комплексе «Гроза» // *Журнал технической физики*. — 2007. — Т. 77. — № 11. — С. 109–114.
12. Гуревич А. В., ..., Щенетов А. Л., и др. Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды // *Успехи физических наук*. — 2009. — Т. 179. — № 7. — С. 779–790.
13. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Influence of cosmic rays and the runaway-electron breakdowns on thunderstorm processes in the atmosphere // *Radiophys. Quantum Electron.* — 2009. — V. 52. — № 9. — P. 627–640.
14. Gusev G. A., ..., Shchepetov A. L., et al. Cosmic rays as a new instrument of seismological studies // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* — 2011. — V. 38. — № 12. — Pp. 374–379.
15. Vil'danova L. I., ..., Shepetov A. L., et al. The first results of observations of acoustic signals generated by cosmic ray muons in a seismically stressed medium // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* — 2013. — V. 40. — № 3. — P. 74–79.
16. Chubenko A. P., Shepetov A. L., et al. New complex EAS installation of the Tien Shan mountain cosmic ray station // *Nucl. Instrum. Methods A*. — 2016. — V. 832. — P. 158–178.— arXiv:1912.13356 [astro-ph.HE].
17. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Observations of high-energy radiation during thunderstorms at Tien-Shan // *Phys. Rev. D*. — 2016. — V. 94. — P. 023003–9.
18. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Cosmic rays and thunderstorms at the Tien-Shan mountain station // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2013. — V. 409. — № 2. — P. 012235.
19. Ryabov V. A., ..., Shepetov A. L., et al. Modern status of the Tien-Shan cosmic ray station // *EPJ Web of Conf.* — 2017. — V. 145. — P. 12001.

20. *Boos E., ..., Shepetov A., et al.* Search for EAS radio-emission at the Tien-Shan shower installation at a height of 3340 m above sea level // *EPJ Web of Conf.* — 2017. — V. 145. — P. 11003.
21. *Zusmanovich A. G., Kryakunova O. N., Shepetov A. L.* The Tien-Shan mountain cosmic ray station of the Ionosphere Institute of Kazakhstan Republic // *Adv. Space Res.* — 2009. — V. 44. — № 10. — P. 1194–1199.
22. *Shepetov A., et al.* The STM32 microcontroller based pulse intensity registration system for the neutron monitor // *EPJ Web of Conf.* — 2017. — V. 145. — P. 19002.— arXiv:1712.00713 [physics.ins-det].
23. *Abunin A. A., ..., Shepetov A. L., et al.* //Efficiency of detection for neutron detectors with different geometries // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* — 2011. — V. 75. — № 6. — P. 866–868.
24. *Ammosov V. V., ..., Shepetov A. L., et al.* Investigation of the characteristics of an ionization-neutron calorimeter in 4–70 GeV hadron beams at the IHEP accelerator // *Technical Phys. Lett.*. — 1998. — V. 24. — № 10. — P. 803–805.
25. *Ammosov V. V., ..., Shepetov A. L., et al.* A new method of ionization-neutron calorimeter for direct investigation of high-energy electrons and primary nuclei of cosmic rays up to the knee region // *Nucl. Instrum. Methods A.* — 2001. — V. 459. — № 1–2. — P. 135–156.
26. *Antonova, V. P., ..., Shepetov A. L., et al.* Modernised Tian-Shan installation for the study of anomalous delayed E.A.S. component. // *Proceedings of the 27th ICRC.* — V. HE-045. — Hamburg, Germany. — 2001. — P. 197–200.
27. *Chubenko A. P., Shepetov A. L., et al.* The underground neutron events at Tien-Shan // *Proc. of the 30th ICRC.* — V. 4 (HE-1). — México City, México. — 2008. — P. 3–6.
28. *Chubenko A. P., Shepetov A. L., et al.* The underground neutron calorimeter for registration of the neutron-bearing cosmic ray component at Tien Shan // *Proceedings of the 30th ICRC.* — V. 4 (HE-1). — México City, México. — 2008. — P. 97–100.

29. Chubenko A. P., Shepetov A. L., et al. Neutron events in the underground monitor of the Tien Shan high-altitude station // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* — 2007. — V. 34. — № 4. — P. 107–113.
30. Shepetov A., et al. Underground neutron events at Tien Shan // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2019. — V. 1181. — P. 012017. — arXiv:1912.13354 [astro-ph.HE].
31. Shepetov A. L., et al. The Geant4 simulation of an electron-photon avalanche development in thundercloud atmosphere // *News of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences.* — 2019. — V. 1. — № 2. — P. 38–50.
32. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Intensive X-ray emission bursts during thunderstorms // *Phys. Lett. A.* — 2000. — V. 275. — № 1–2. — P. 90–100.
33. Chubenko A. P., Shepetov A. L., et al. Energy spectrum of lightning gamma emission // *Phys. Lett. A.* — 2009. — V. 373. — № 6. — P. 2953–2958.
34. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. An intracloud discharge caused by extensive atmospheric shower // *Phys. Lett. A.* — 2009. — V. 373. — № 39. — P. 3550–3553.
35. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Observation of the intercloud discharge induced by an extensive air shower in a thunderstorm atmosphere // *30th International Conference on Lightning Protection (ICLP).* — Cagliari, Italy. — 2010.
36. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Gamma-ray emission from thunderstorm discharges // *Phys. Lett. A.* — 2011. — V. 375. — № 15. — P. 1619–1625.
37. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. The effective growth of the gamma-ray background during a thunderstorm // *Phys. Lett. A.* — 2011. — V. 375. — P. 4003–4006.
38. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Correlation of radio and gamma emissions in lightning initiation // *Phys. Rev. Lett.* — 2013. — V. 111. — № 10. — P. 165001.
39. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Effective growth of a number of cosmic ray electrons inside thundercloud // *Phys. Lett. A.* — 2003. — V. 309. — № 1. — P. 90–102.

40. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Experimental evidence of giant electron-gamma bursts generated by extensive atmospheric showers in thunderclouds // *Phys. Lett. A.* — 2004. — V. 325. — № 5. — P. 389–402.— arXiv:0401037 [hep-ex].
41. Shepetov A. L., et al. The prolonged gamma ray enhancement and the short radiation burst events observed in thunderstorms at Tien Shan // *Atmos. Res.* — 2021. — V. 248.— № 1. — P. 105266. — arXiv:2009.07307 [physics.ao-ph].
42. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Bursts of gamma-rays, electrons and low-energy neutrons during thunderstorms at the Tien-Shan // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2013. — V. 409. — № 2. — P. 2235.
43. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Results of detecting thermal neutrons at Tien Shan high altitude station // *Geomagnetism and Aeronomy* — 2009. — 6. — V. 49 — № 6. — Pp. 761–767.
44. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Strong flux of low-energy neutrons produced by thunderstorm // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — V. 108. — № 3. — P. 125001–4.
45. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. The time structure of neutron emission during atmospheric discharge // *Atmos. Res.* — 2015. — V. 164–165. — P. 339–346.
46. Gurevich A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Simultaneous observation of lightning emission in different wave ranges of electromagnetic spectrum in Tien Shan mountains // *Atmos. Res.* — 2018. — V. 211. — P. 73–84.
47. Agafonov A. V., ..., Shepetov A. L., et al. Observation of hard radiations in a laboratory atmospheric high-voltage discharge // *J. Phys. D Appl. Phys.* — 2017. — V. 50. — P. 165202–165211.— arXiv:1604.07784 [physics.plasm-ph].
48. Shepetov A. L., et al. Seismic signal registration with an acoustic detector at the Tien Shan Mountain Station // *News of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences.* — 2018. — V. 3. — P. 47–56.
49. Mukashev K. M., ..., Shepetov A. L., et al. Investigation of acoustic signals correlated with the flow of cosmic ray muons in connection with seismic activity of Northern Tien Shan // *Acta Geophys.* — 2019. — V. 67. — P. 1241–1251.

*Щепетов Александр Леонидович*

Аппаратурно-программный комплекс для исследования космических лучей  
и геофизических процессов на Тянь-Шаньской высокогорной станции

Автореф. дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 50 экз.

Типография \_\_\_\_\_