

УТВЕРЖДАЮ

Вице-директор Института

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ  
ТЕМЫ / КРУПНОГО ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о теме**

**1.1. Шифр темы**

02-2-1125-2011/2023

**1.2. Лаборатория**

ЛЯП

**1.3. Научное направление**

Физика частиц

**1.4. Наименование темы**

Астрофизические исследования в эксперименте TAIGA

**1.5. Руководитель темы**

Бородин А.Н.

**1.6. Заместитель руководителя темы**

Ткачев Л.Г.

**2. Научное обоснование и организационная структура**

**2.1. Аннотация по проекту TAIGA**

Астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) предназначен для исследования гамма-излучения заряженных космических лучей в диапазоне энергий  $10^{13}$ – $10^{18}$  эВ методом регистрации черенковского излучения от широких атмосферных ливней (ШАЛ) и расположен в Тункинской долине (51.49 С.Ш., 103.04 В.Д.), в 50 км от озера Байкал (рис.1).

В состав комплекса входит уникальная система гибридных детекторов – 3 атмосферных черенковских телескопа (АЧТ) и две широкоугольные черенковские установки ШАЛ – Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE с эффективной площадью 3 км<sup>2</sup> и 1 км<sup>2</sup> соответственно и две установки для детектирования заряженных космических лучей – Тунка-Гранде и Тунка-Мюон

**2.2. Проекты в теме**

Астрофизические исследования в эксперименте TAIGA

**Научное обоснование** (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

Ключевая идея состоит в объединении в составе одного комплекса двух различных методов регистрации черенковского излучения ШАЛ (imaging and non-imaging (timing)), а именно: АЧТ (Атмосферный Черенковский Телескоп) - телескопов, получающих изображение широких атмосферных ливней (ШАЛ) путем регистрации черенковского излучения и широкоугольных черенковских детекторов. Главным преимуществом работы АЧТ совместно с широкоугольными черенковскими установками является возможность выделения событий от гамма-квантов на фоне ШАЛ от заряженных космических лучей по данным одного или нескольких АЧТ, используя при этом информацию об энергии, положении и направлении оси ШАЛ, восстанавливаемые по данным широкоугольной установки.

К основным направлениям исследования комплекса относятся задачи гамма-астрономии и физики космических лучей:

**1. Исследование энергетического спектра гамма-квантов от Галактических источников и поиск новых источников гамма-квантов.** Планируется восстановить спектр гамма-квантов от галактических источников (Крабовидная туманность, Dragonfly, J2227+610 (G106.3+2.7), J2031 +415 (CygnusCocoon), сверхновая Тихо-Браге) важных для понимания происхождения космических лучей.

**2. Мониторинг потока гамма-квантов от близких внегалактических источников.** Исследование формы спектра гамма-квантов с энергией выше 8 ТэВ от внегалактических источников позволит получить ограничения на плотность внегалактического фонового излучения, осуществить поиск «аксионоподобных» частиц.

**3. Поиск гамма-квантов ТэВного диапазона от гамма-всплесков и гамма-квантов, скоррелированных с нейтрино высоких энергий.**

**4. Поиск космических ускорителей, в которых протоны ускоряются до энергий 100 – 3000 ТэВ.** Для поиска таких ускорителей будет проведено исследование особенностей спектра заряженных космических лучей в интервале энергий 100–3000 ТэВ. Будет измерена доля протонов и гелия среди ядер заряженных космических лучей.

**5. Исследование массового состава космических лучей в области перехода от галактических к внегалактическим лучам.**

На данный момент TAIGA - самая северная гамма-обсерватория мирового уровня Рис.1. В программу наблюдения обсерватории входят источники, время наблюдения которых достаточно большое для северного расположения обсерватории: Крабовидная туманность, Dragonfly, остатки сверхновых Тихо Браге, СТА-1, G106.3+2.7, источники в туманности SygnysCocoon, блазары Mrk501, Mrk421 и др. Совместная работа черенковских телескопов и широкоугольной установки, кроме исследований в области гамма-астрономии, позволит продвинуться в изучении характеристик массового состава космических лучей в энергетической области, недостаточно изученной в прямых экспериментах на спутниках.

**Риски проекта** связаны с отсутствием финансирования при расширении конкурирующих проектов по гамма-астрономии по всему миру и с возможными задержками при замене недоступных компонентов на эквивалентные доступные при проектировании новых черенковских телескопов (как малых широкоугольных телескопов, так и с большой площадью главного зеркала).

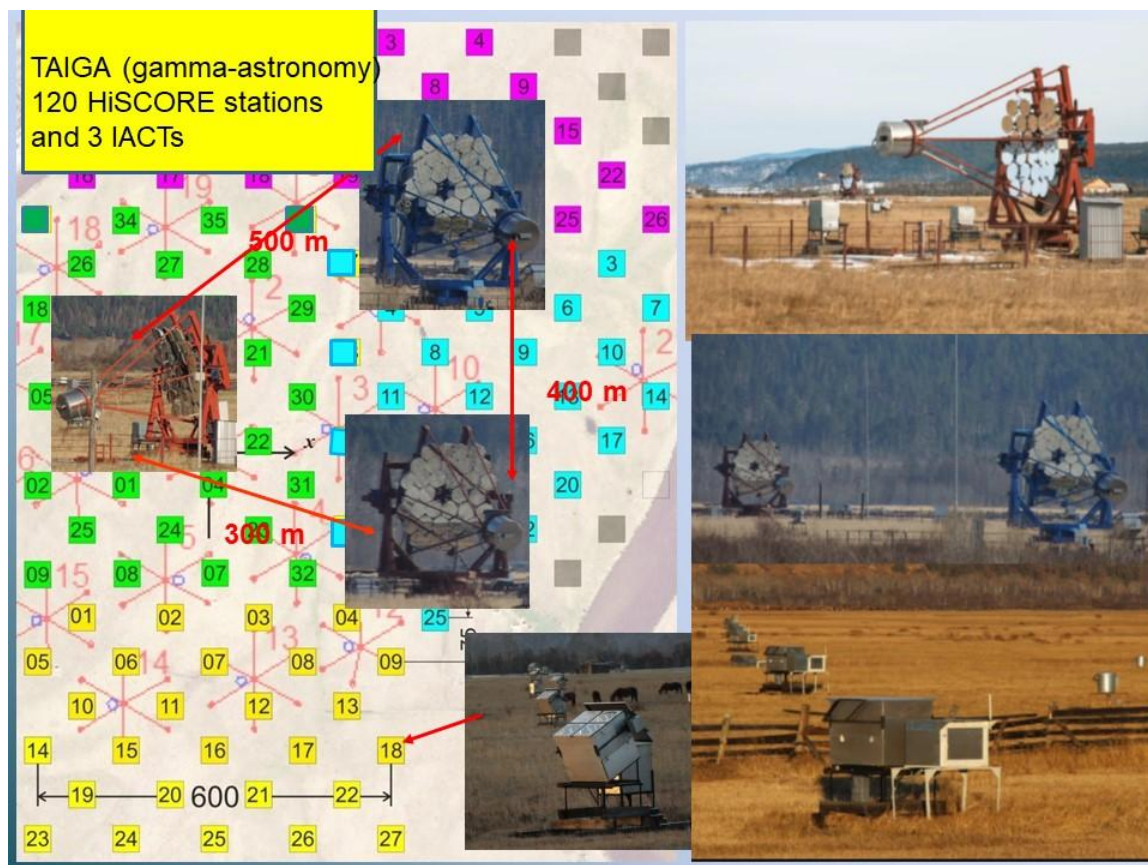


Рис.1 План расположения детекторов комплекса TAIGA. Цветные квадраты – станции HiSCORE.

### Программа развития астрофизического комплекса

Ближайшее развитие астрофизического комплекса TAIGA связано с созданием еще двух атмосферных черенковских телескопов и существенное увеличение площади мюонных детекторов (установка TAIGA-MUON).

Один из недостатков гибридного подхода в существующем варианте астрофизического комплекса является существенное различие между угловой апертурой черенковских телескопов и апертурой установки TAIGA-HiSCORE, приводящие к возможности наблюдения в данный момент времени только один источник. Для исправления этой ситуации, планируется создать малые изображающие черенковские телескопы (SIT) с угловой апертурой 25-30 градусов и энергетическим порогом 80-100 ТэВ. Совместная работа таких телескопов и установки TAIGA-HiSCORE почти в 10 раз увеличит число гибридных событий, для которых возможно выделение гамма-квантов на фоне событий от космических лучей. Дальнейшее развитие астрофизического комплекса, скорее всего в другом месте, связано с расширением установки TAIGA-HiSCORE на площадь в 10 раз большую и дополненную малыми изображающими черенковскими телескопами.

### 2.2.1 Дополнительная научная активность - Исследование Восходящих и Горизонтальных Широких Атмосферных Ливней (ИВГШАЛ).

#### Аннотация

Измерения спектра, массового состава и анизотропии Космических Лучей Предельно Высоких Энергий (КЛПВЭ)  $E = 10^{18} - 10^{20}$  эВ являются одной из важнейших задач современной

астрофизики высоких энергий и остаются открытыми, несмотря на многолетние исследования работающих в настоящее время из-за недостаточной статистики. В частности, не обнаружены события от GZK-фотонов и нейтрино. Ультра большие энергии КЛПВЭ частиц позволяют проводить КЛ-астрономию. Однако источники КЛПВЭ пока не обнаружены.

Поэтому особый интерес представляют проекты исследований КЛПВЭ с помощью детекторов на орбите спутника Земли. Серьезной проблемой таких детекторов является 100-кратное ослабление сигнала по сравнению с детекторами на Земле, но их важным преимуществом является возможность получения данных со всех направлений небесной сферы одной и той же установкой. В связи с этим подана Заявка в РОСКОСМОС о проекте эксперимента ИВГШАЛ на создаваемую в настоящее время Российскую Орбитальную Станцию (РОС), представленную на Рис.2.



Рис.2. Схематический вид Российской Орбитальной Станции (РОС).

Научной задачей и целью ИВГШАЛ является измерение спектра, состава и источников КЛ в диапазоне  $10^{19}$ - $10^{21}$  эВ. Предлагается изготовить камеру Шмидта с диаметром главного зеркала в пределах 3000 мм. На рис. 3 представлен схематический вид оптической системы для диаметра главного зеркала 3000 мм: диаметр корректирующего планоида 1840 мм, диаметр фокальной поверхности 800 мм, поле зрения  $\pm 15^\circ$ . Необходимый угол зрения по вертикальной оси  $\pm 2^\circ$ , а по горизонтальной оси  $\pm 15^\circ$ .

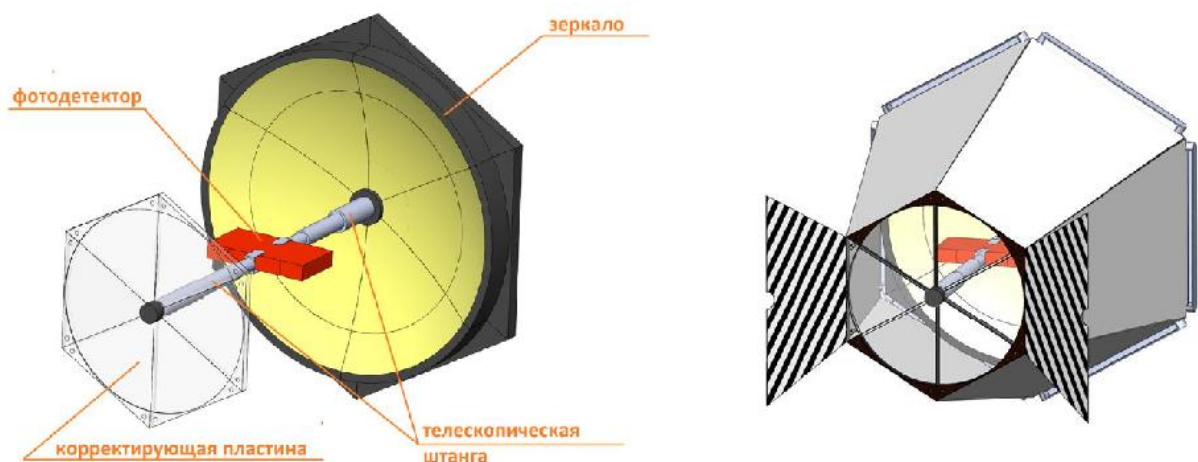


Рис. 3. Схематическое изображение детектора ИГВШАЛ без светозащитного кожуха (слева) и с кожухом (справа).

Предлагаемый проект эксперимента на создаваемой РОС имеет большое научное значение и в случае положительного решения будет финансироваться из средств Федеральной космической программы. На данном этапе подготовки эксперимента ИВГШАЛ предполагается разработать программу Монте-Карло моделирования горизонтальных и восходящих ШАЛ с целью определения параметров фотодетектора установки, оценке нижнего порога регистрации КЛПВЭ событий и ожидаемой статистике. Кроме того, из средств по теме 1125 предполагается также разработать, изготовить и провести тестовые эксперименты с прототипом детектора для выбора окончательного варианта конструкции фокусирующего зеркала и наносекундной электроники фотодетектора, в том числе необходимость и параметры системы ее термостабилизации.

### 2.2.2 Дополнительная научная активность - участие в подготовке космического эксперимента Обсерватория Лучей Высоких Энергий (ОЛВЭ-HERO)

#### Аннотация

Измерение спектра, массового состава и анизотропии Космических Лучей в области  $E=10^{12} - 10^{16}$  эВ является одной из важнейших задач современной астрофизики высоких энергий. Предшественником ОЛВЭ-HERO (Обсерватория Лучей Высоких Энергий - High Energy Ray Observatory) был эксперимент НУКЛОН, в котором были измерены спектры и элементный состав КЛ в интервале энергий  $10^{11}-10^{15}$  эВ. Уникальные параметры проектируемого детектора позволят в течение 5 лет прямых внеатмосферных измерений получить данные, большая статистика которых позволит определить изменения состава в диапазоне  $10^{15}-10^{16}$  эВ, который является переходным от галактических КЛ к внегалактическим КЛ, а также провести измерение угловой анизотропии КЛ.

В качестве основного детектора ОЛВЭ-HERO предполагается сцинтилляционно-вольфрамовый тонко гранулированный трековый калориметр весом 10-12 тон, в котором будет использоваться борированный сцинтиллятор, что позволит измерять дополнительный нейтронный сигнал, который позволит улучшить энергетическое разрешение калориметра и, главное, повысит на 1.5–2 порядка уровень режекции между электромагнитной и адрон-ядерной компонентами космических лучей во всем диапазоне энергий, что очень важно, так как величины этих потоков отличаются на 3-4 порядка. Калориметр со всех сторон окружен

кремниевой четырехслойной системой измерения заряда с перекрытием ~95% площади в угле обзора ~2π.

На левом Рис.4 показаны примеры результатов моделирования разрешения калориметра по энергии с указанными геометрическими параметрами. На правом Рис.4 показана ожидаемая статистика потока КЛ в диапазоне  $10^4$ - $3 \cdot 10^7$  ГэВ.

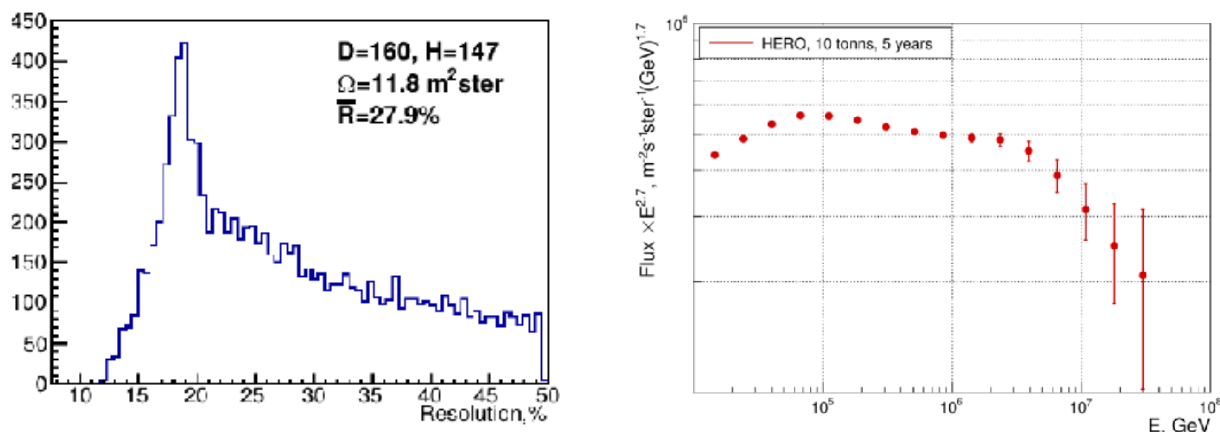


Рис.4. Результаты МС-моделирования 10-тонного варианта детектора.

Основные параметры детектора ОЛВЭ-HERO:

Эффективный геометрический фактор - протоны  $9 \text{ м}^2\text{ср}$ ; тяжелые ядра  $14 \text{ м}^2\text{ср}$ ; электроны и гамма  $16 \text{ м}^2\text{ср}$ .

Фактор экспозиции: протоны  $90 \text{ м}^2\text{ср год}$ ; тяжелые ядра  $140 \text{ м}^2\text{ср год}$ ; электронов и гамма  $160 \text{ м}^2\text{ср в год}$ .

Энергетическое разрешение: протоны 25%, ядра ~10-15%, электроны и гамма ~5%.

Зарядовое разрешение: 0,2 единицы заряда.

Уровень подавления: протоны/электроны  $10^5$ - $10^6$ , гамма/электроны  $>10^3$ .

Общая масса 10-12 тонн.

Потребляемая мощность <3500 Вт

Реализация ОЛВЭ-HERO даст возможность в энергетическом диапазоне  $10^{12}$ - $10^{16}$  эВ перевести знания по физике КЛ в математически точную науку. Зарядовое, энергетическое разрешения и объем статистического материала позволит определить основные характеристики потока КЛ с точностью в доли процента, что позволит их сравнить с прецизионными данными в эксперименте AMS-02 на МКС с верхним порогом регистрации  $10^{12}$  эВ. Объединение данных AMS-02 и ОЛВЭ-HERO даст полную картину образования и распространения КЛ высоких энергий в Галактике.

В рамках подготовки этого эксперимента в ОИЯИ были разработаны, изготовлены и протестированы на пучках SPS в CERN прототипы борированных калориметров. В ближайшие 2-3 года предполагается спроектировать, изготовить и испытать на выведенных пучках протонов и ядер более совершенные прототипы калориметра ОЛВЭ-HERO с целью выбора окончательной конструкции аппарата. Кроме того, проводится МС-моделирование эксперимента с целью определения фона, обусловленного поглощением тепловых нейтронов с образованием альфа-частиц, возникающих от суммарного потока КЛ, которые, в свою очередь, определяют пороговую энергию чувствительности детектора.

Головной организацией в подготовке эксперимента ОЛВЭ-HERO является НИИЯФ МГУ. В рамках Федеральной Космической Программы (ФКП) на 2016-2025 гг. ведется НИР

ОЛВЭ-HERO. Данный проект, в качестве ОКР, включен в ФКП с 2021 г., с запуском в период до 2030 г.

## 2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

ЛЯП, ЛФВЭ, ЛНФ, ЛИТ

### 2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты	20	20	20	20	20
Tier 1 (ядро-час)	-				
Tier 2 (ядро-час)	-				
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU	-				
Облака (CPU ядер)	200	200	200	200	200

## 2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
JINR	Russia	Dubna	A.N. Borodin V.M. Grebenyuk A.V. Blinov A.A Grinuyk M.V. Lavrova A. Pan I. Satyshev L.G. Tkachev А.Б.Садовский Н.В.Горбунов С.Ю.Пороховой Х.Караташ Е.Шолтан  А.Шайковский А.Пан С.Сатышев А.Д.Рогов А.В.Красноперов	соглашение о создании консорциума GAMMA,
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics MSU	Russia	Moscow	L.A. Kuzmichev L.G. Sveshnikova +15 чел. P.A.Klimov +5 чел	соглашение о создании консорциума GAMMA,

			D.M.Podorozhny + 10 чел.	соглашение о сотрудничестве
Institute of Applied Physics, ISU,	Russia	Irkutsk	N.M. Budnev R.Mirgazov D.P. Zhurov + 29 чел	соглашение о создании консорциума ГАММА, соглашение о сотрудничестве
Institute for Nuclear Research of RAS,	Russia	Moscow	B.K.Lubsandorzhev + 5 чел	соглашение о создании консорциума ГАММА
IZMIRAN,	Russia	Moscow Region	V.S. Ptuskin	соглашение о создании консорциума ГАММА
National Research Nuclear University MEPhI,	Russia	Moscow	A.A. Petrukhin I.I. Yashin + 5 чел	соглашение о создании консорциума ГАММА
Novosibirsk State University, NSU,	Russia	Novosibirsk,	E.A. Kravchenko + 5 чел	соглашение о создании консорциума ГАММА
Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,	Russia	Novosibirsk,	E.A. Kravchenko +4 чел	соглашение о создании консорциума ГАММА
Altai State University,	Russia	Barnaul	A.A. Lagutin R.I. Raikin N.V. Volkov	соглашение о создании консорциума ГАММА
Италия	Italy	Turin	A. Chiavassa	
Ulaanbaatar University	Mongolia	Ulaanbaatar	R. Togo	
Институт ядерной физики" Министерства энергетики Республики Казахстан — проведение тестов прототипов реакторе ИЯФ	Республика Казахстан	Алматы	Мухамеджанов Ержан Серикович + 5 чел.	Дополнительное соглашение №1 ОИЯИ- ИЯФ Алматы
	Россия	Королев	О.Сапрыкин +5 чел.	
Myung-Jae Lee Department of Physics, Sungkyunkwan University (SKKU), Suwon, Korea.	Республика Корея	Suwon	I.Pack + ? чел.	



## 2.6. Организации-соисполнители

1. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics MSU, Moscow, Russia
  - data processing and physical analysis, IACT camera fabrication, DAQ, MC-simulation
2. Institute of Applied Physics, ISU, Irkutsk, Russia
  - Tunka infrastructure, data taken, control electronics for IACTs and HiSCORE, deployment of detectors, HiSCORE MC-simulation and data analysis
3. Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia
  - IACT camera fabrication, muon detectors
  - Methodical question IACTs construction and calibration, data analysis, HiSCORE PMTsHiSCORE and IACT MC-simulation
4. IZMIRAN, Moscow Region, Russia
  - theoretical support
5. National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia
  - data analysis, IACT camera fabrication , MC-simulation
6. JINR, Dubna, Russia
  - full responsibility in the design, fabrication and tests of IACTs mechanics at JINR, participation in the software development and Monte-Carlo simulation, in data taking in Tunka area and in off-line analysis. Development and production of IACT mirror facets, IACT mirror actuator production,
7. Novosibirsk State University, NSU, Novosibirsk, Russia
  - design and fabrication muon detectors
8. Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia
  - design and fabrication muon detectors
  - IACT electronic components
9. AltaiStateUniversity, Barnaul, Russia
10. Институт ядерной физики" Министерства энергетики Республики Казахстан
  - Участие в разработке и изготовлении прототипа ОЛВЭ-HERO, проведении MC моделирования эксперимента ОЛВЭ-HERO, тестах прототипа на НУКЛОТРОНЕ, реакторе ИЯИ и Тянь-Шанской высокогорной космической станции и обработке данных.
11. СКБ Автоматика
  - разработка и изготовление детекторов и электроники ОЛВЭ-HERO
12. ОАО "Консорциум "Космическая регата". г.Королев, Московская обл.
  - разработка, изготовление и тесты оптической системы.
13. Myung-Jae Lee Department of Physics, Sungkyunkwan University (SKKU), Suwon, Korea.
  - участие в разработке и изготовлении фотодетектора, электроники сбора и фильтрации данных, а также создания комплекса программ офф-лайн анализа данных

### 3. Кадровое обеспечение

#### 3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	4.8	
2.	инженеры	4.7	
3.	специалисты	1.0	
4.	студенты	2.0	
5.	рабочие		
	<b>Итого:</b>	<b>12.5</b>	

#### 3.2. Доступные кадровые ресурсы

##### 3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	A.Borodin	ЛЯП	researcher	1.0
		L. Tkachev	ЛЯП	researcher	1.0
		N.Gorbunov	ЛФВЭ	researcher	0.1
		A.Krasnoperov	ЛЯП	researcher	0.1
		A.Rogov	ЛНФ	researcher	0.1
		V. Grebenyuk	ЛЯП	researcher	1.0
		M. Lavrova	ЛЯП	researcher	1.0
		I.Satyshev	ЛИТ	researcher	0.5
2.	инженеры	A. Grinyuk	ЛЯП	engineer	1.0
		A.Pan	ЛЯП	engineer	1.0
		S. Porokhovoy	ЛЯП	engineer	0.2
		A. Blinov	ЛЯП	engineer	1.0
		A. Skrypnik	ЛЯП	engineer	0.1
3.	специалисты	Y.Pavlov	ЛЯП	technician	1
		A.Shaykovsky	ЛЯП	designer	0.4
		S. Eldos	ЛЯП	student	1.0
		H. Karatash	ЛЯП	student	1.0
4.	рабочие				
	<b>Итого:</b>				<b>12.5</b>

### 3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники		
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	рабочие		
	<b>Итого:</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

## 4. Финансовое обеспечение

### 4.1. Полная сметная стоимость проекта / подпроекта КИП

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).

Детализация приводится в отдельной форме.

**460 к\$**

№№ п/п	Наименование работ	Стоимость, к\$	Расходы в год (тыс. долл. США)				
			1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год...
1.	Международное сотрудничество (МНТС)	75	15	15	15	15	15
2.	Материалы	120	30	30	20	20	20
3.	Оборудование и услуги сторонних организаций						
4.	Пуско-наладочные работы	15	3	3	3	3	3
5.	Услуги научно-исследовательских организаций						
6.	Приобретение программного обеспечения						
7.	Проектирование/строительство						
8.	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)						
<b>ВСЕГО:</b>		<b>210</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>38</b>

### 4.2. Внебюджетные источники финансирования

Руководитель проекта /подпроекта КИП \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_ /

**СОГЛАСОВАНО:**

**Главный ученый секретарь Института**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**Директор лаборатории**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**Руководитель ДБиЭП**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**Ученый секретарь лаборатории**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**Руководитель ДНОД**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**Экономист лаборатории**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**Руководитель ДКиД**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**Руководитель темы**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**Руководитель проекта (шифр проекта)/  
(шифр подпроекта КИП)**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**Руководитель проекта (шифр проекта) /  
(шифр подпроекта КИП)**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 202\_г.

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Лаборатории

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**ОТЧЕТ ПО ТЕМЕ / КРУПНОМУ ИНФРАСТРУКТУРНОМУ ПРОЕКТУ  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о теме**

**1.1. Шифр темы**

02-2-1125-2011/2023

**1.2. Лаборатория**

ЛЯП

**1.3. Научное направление**

Физика частиц

**1.4. Наименование темы**

Астрофизические исследования в эксперименте TAIGA

**1.5. Руководитель темы**

Бородин А.Н.

**Заместитель руководителя темы**

Ткачев Л.Г.

**1.6. Проекты в теме / подпроекты КИП**

Астрофизические исследования в эксперименте TAIGA

## 2. Научный отчет об исполнении темы / КИП

### 2.1. Аннотация

Многоканальная астрономия — новое направление в современной астрофизике, важной частью которого является гамма-астрономия высоких энергий. Гамма-лучи представляют собой самую высокоэнергетическую часть электромагнитного спектра и являются уникальным инструментом для исследования самых энергичных и самых экстремальных процессов во Вселенной. Имеется ряд фундаментальных вопросов для гамма-астрономии сверхвысоких энергий (СВЭ), на которые в настоящее время нет ответов, и прежде всего вопрос об источниках галактических КЛ с энергиями  $\sim$ ПэВ.

До сих пор большая часть данных гамма-астрономии в диапазоне энергий ТэВ и субТэВ была получена с помощью изображающих атмосферных черенковских телескопов (АЧТ), в частности, со стереосистемами нескольких таких телескопов. Прототип гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy), который строится в Тункинской долине, нацелен на диапазон энергий выше 30 ТэВ. Обсерватория сочетает в себе несколько IACT с набором относительно дешевых широкоугольных детекторов без изображения HiSCORE (High Sensitivity Cosmic Origin Explorer). Это позволяет увеличить площадь прибора до нескольких квадратных километров и значительно подавить фон от заряженных КЛ. Сочетание двух взаимодополняющих методов гамма-исследования позволяет построить прибор большой площади при относительно низкой цене. TAIGA является первым детектором такого рода.

Полный масштаб обсерватории TAIGA по плану должен охватывать площадь 10 км<sup>2</sup> и включать в себя сеть из  $\sim$ 1000 широкоугольных (0,6 ср) синхронизированных детекторов черенковского света HiSCORE, до 16 АЧТ с анализом изображения ливня (поле зрения 10 $\times$ 10 градусов) и мюонные детекторы с общей чувствительной площадью 2000 м<sup>2</sup>, распределенные на площади 1 км<sup>2</sup>. Прототип обсерватории размещен в Тункинской долине - 50 км от озера Байкал. ОИЯИ несет полную ответственность за изготовление механики черенковских телескопов и составных зеркал. Кроме того, команда ОИЯИ участвует в сменах при сборе данных в Тункинском районе, моделировании МК и физическом анализе данных.

За предыдущие года площадь TAIGA-HiSCORE увеличилась до 1 км<sup>2</sup>, развернуто еще три IACT и 200 м<sup>2</sup> новых мюонных детекторов. С таким прототипом можно выполнять следующую научную программу:

1. Изучение высокоэнергетического края спектра ярчайших галактических и внегалактических источников гамма-излучения.
2. Поиск галактических ПеВатронов.
3. Применить новый гибридный подход для изучения массового состава КЛ в диапазоне 10<sup>14</sup> - 10<sup>17</sup> эВ.
4. Изучение анизотропии КЛ в области энергий 100 – 3000 ТэВ.

### 2.2. Развернутый научный отчет

#### Введение

Прогресс в понимании природы высокоэнергетических источников КЛ в нашей Галактике и в Метагалактике идет по пути регистрации в экспериментах 3 типов астрочастиц: заряженных КЛ, гамма-квантов и нейтрино. Для диапазона энергий гамма-квантов выше 30 ТэВ существует ряд принципиальных вопросов, на которые в настоящее время нет ответов. Прежде всего, речь идет об источниках Галактических космических лучей с энергиями около 1 ПэВ, области энергий, примерно примыкающей к классическому излому в энергетическом спектре КЛ. Изучение вторичных гамма-квантов, генерируемых КЛ в окрестности источника, где происходит ускорение частиц, позволяет прояснить механизм ускорения галактических КЛ. В экспериментах H.E.S.S. [1. F.Aharonian (HESS Collaboration)//Astroparticle Physics 34(2011) 738-747], VERITAS [2. V.Acciari (VERITAS Collaboration) Ap.J Letters 730 (2011) L20], MAGIC [3. Albert et al (MAGIC)// Astrophys.J.639:761-765,2006], MILAGRO [4. Abdo A.A. et al.,(Milagro)

2007, ApJ 664, L91], HAWC [5. A.Abdo et al. (Milagro)//arXiv: 1403.0161] были обнаружены источники со спектрами гамма-излучения, простирающимися до нескольких десятков ТэВ. Кроме того, несколько измерений нейтрино высоких энергий с помощью детектора IceCube указывают на источники гамма-излучения СВЭ, доступные для экспериментальных исследований.

Гамма-излучение высоких энергий, попадая в атмосферу, запускает электромагнитный каскад вторичных  $e^-$ ,  $e^+$  и фотонов, широкий атмосферный ливень (EAS, ШАЛ). Два отдельных косвенных метода измеряют такие EAS. Поверхностные массивы детекторов измеряют вторичные частицы, которые достигают уровня земли. Такой инструмент имеет рабочий цикл, близкий к 100%, а также большое поле зрения (FoV). Однако их рабочие параметры, такие как энергетический порог и разрешающая способность, довольно низкие. Напротив, IACT измеряют черенковский свет, создаваемый вторичными заряженными частицами в ШАЛ. Наблюдения на IACT в основном ограничиваются хорошей погодой и темными ночами, что приводит к низкому рабочему циклу  $\sim 10\%$ . Кроме того, поле зрения IACT обычно составляет всего несколько градусов в поперечнике. Однако их рабочие параметры, такие как энергетическое и угловое разрешение и энергетический порог, позволяют проводить углубленные исследования отдельных источников.

До сих пор большинство данных гамма-астрономии в ТэВ и суб-ТэВ было получено с использованием IACT, в частности, со стереосистемами нескольких таких телескопов. Прототипобсерватории TAIGA [6, N. Budnev et al. (TAIGA Collaboration), Jour.Phys: Conf. Series 718 052006 (2016), 7. Budnev N. et al., (TAIGA Collaboration), NIMA 845, 384 (2017)], строящейся в Тункинской долине, нацелена на диапазон энергий гамма-квантов выше 30 ТэВ. Обсерватория объединяет несколько черенковских телескопов с сетью сравнительно дешевых широкоугольных ( $\sim 0,6$  ср) не изображающих оптических детекторов TAIGA-HiSCORE [8 Tluczykont, D. Hampf, D. Horns, L.Kuzmichev et al. Astropart. Phys., 56:42, 2014]. Это позволяет увеличить площадь установки до нескольких квадратных километров и значительно подавить фон от заряженных КЛ за счет хорошего гамма-адронного разделения IAST ( $\sim 100$  при энергиях выше 100 ТэВ). Сочетание двух взаимодополняющих методов гамма-разделения позволяет построить устройство большой площади при относительно низкой цене. TAIGA — первый детектор такого рода.

Полный масштаб обсерватории TAIGA по предварительному плану будет охватывать площадь  $10 \text{ км}^2$  и включать  $\sim 1000$  детекторов TAIGA-HiSCORE, до 16 черенковских телескопов с анализом изображений ШАЛ (поле зрения  $\sim 10$  градусов) и мюонных детекторов общей чувствительной площадью  $2000 \text{ м}^2$ , распределены на площади  $1 \text{ км}^2$ . Преимуществом телескопов IACT в сочетании с массивом HiSCORE является возможность использования информации изображения о характеристиках ШАЛ (положение оси, направление прихода частицы, энергия) для лучшего разделения гамма-адронных событий. Это позволяет даже при расстоянии между телескопами до 600 м поддерживать уровень подавления  $\sim 0,01$  адронных ливней при энергии 100 ТэВ. Чувствительность обнаружения локальных источников обсерватории площадью  $10 \text{ км}^2$  в диапазоне энергий 30 – 200 ТэВ ожидается на уровне  $10\text{--}13 \text{ эрг см}^{-2}\text{с}^{-1}$  на 500 часов наблюдения или 10 регистрируемых событий, что сравнимо с планируемой чувствительностью проектов гамма-астрономии (LHAASO [9. G.Di.Sciascio (LHAASO collaboration) //arXiv: 1602.07600], CTA [10. B.S.Acharya et al. (CTA collaboration) Astroparticle Physics 43 (2013) 3-18;]) в этом диапазоне энергий.

В 2019 году время прототип обсерватории TAIGA состоял из 85 станций HiSCORE на площади  $0,7 \text{ км}^2$  и двух IACT. В течение 2020 г. добавлено еще 30 станций HiSCORE и черенковский телескоп с камерой SST-1M на основе SiPM-детекторов, разработанных в рамках проекта CTA [11 Schioppa E.J. et al. [CTA SST-1M Project Collaboration] // arXiv:1508.06453]. Эта работа не была реализована (доставка камеры не состоялась). Еще один IACT произведен и установлен в 2021 году.

TAIGA первая установкой, в которой телескопы расположены на расстоянии 300 м и более друг от друга и при этом сохраняются преимущества наблюдения высокоэнергетических гамма-квантов в стереорежиме.

С таким прототипом TAIGA можно не только продемонстрировать преимущества гибридного и стереоподхода для выделения гамма-адронных ШАЛ в много ТэВном диапазоне энергий, но и получить новые интересные результаты при изучении высокоэнергетического края спектра галактические и внегалактические источники.

Участие группы ОИЯИ в проекте TAIGA, поддержано грантом Российского научного фонда (РНФ) № 19-72-20173 «Малогобаритные телескопы в составе экспериментального комплекса гамма-лучевой обсерватории TAIGA» на 2019-2022 гг. .

Коротко о проведенных работах:

**2021.** Моделирование совместной работы IACT с камерным телескопом SST-1M и HiSCORE.

Разработка программного обеспечения для анализа данных IACT+HiSCORE. Исследование гамма-излучения Крабовидной туманности. Наблюдение ярчайших галактических и внегалактических источников гамма-излучения. Ввод в эксплуатацию третьего АЧТ (IACT) с камерой SST-1M на базе Si-PM детекторов (проведены подготовительные работы с камерой в Германии, но доставка камеры на полигон не состоялась). Изготовление четвертого IACT, включая зеркальные элементы (зеркала приобретены в Армении на средства гранта НИИПФ ИГУ). Участие в сборе данных в Tunka и анализе данных.

**2022.** Исследование потока гамма-квантов от блазаров Мкр-421 и МРК-501 в стереорежиме. Участие в сборе данных в Tunka и анализе данных. Принятие в эксплуатацию четвертого АЧТ.

**2023.** Участие в сборе данных в Tunka и анализе данных. Мониторинг источников галактического гамма-излучения. Установить верхний предел констант фотонно-аксионной конверсии на основе изучения энергетических спектров блазаров Мкр 421 и Мрк 501. Планируется подготовить и установить 5 черенковский телескоп с модернизированной механической частью

Подготовить детальный проект расширения прототипа TAIGA до полноценной гамма-обсерватории TAIGA.

**Предмет исследования, ответственность ОИЯИ, планы и ожидаемые результаты.**

Создается гибридная обсерватория TAIGA для изучения космических и гамма-лучей с энергиями  $10^{13}$ - $10^{18}$  эВ. Его основной особенностью является дополнительный гибридный подход к различению событий КЛ от событий гамма-излучения. Он будет включать в себя широкоугольные черенковские детекторы ШАЛ (TAIGA-HiSCORE) и ряд TAIGA-IACT. Первый этап TAIGA будет включать ~100 TAIGA-HiSCORE, распределенных на площади ~1 км<sup>2</sup> и 3-4 TAIGA-IACT на расстоянии 300-500 м друг от друга. Комбинированный метод HiSCORE-IACT будет использоваться для выбора событий гамма-излучения. Направления прихода ШАЛ, положение оси и энергия восстанавливаются по данным станций HiSCORE. Порог регистрации гамма-квантов ШАЛ составляет ~30 ТэВ. Для определения типа частицы, вызвавшей ШАЛ, в основном будет использоваться информация IACT. Исключительное значение имеет расстояние между IACT, которое может быть увеличено до 600 м, что значительно больше, чем у детекторов СТА только с телескопами.

При таком подходе будет построен гибридный детектор с большой площадью, но с относительно небольшим количеством АЧТ. Таким образом, на единицу площади количество АЧТ в гамма-обсерватории TAIGA будет примерно в 10 раз меньше, чем в СТА, и стоимость оборудованного квадратного километра также во много раз меньше. Сравнение чувствительности существующих и проектируемых установок показывает, что чувствительность обсерватории TAIGA по регистрации гамма-квантов с энергиями выше 100 ТэВ находится на уровне других новых установок.



Полный масштаб обсерватории TAIGA [6,7] будет включать сеть из ~500 широкоугольных (FOV ~0,6 ср) синхронизирующих детекторов TAIGA-HiSCORE, до 16 TAIGA-IACT с анализом изображения ливня (FOV ~10 град. ), охватывающих площадь 10 км<sup>2</sup>, и детекторы мюонов с общей чувствительной площадью 2000 м<sup>2</sup>, распределенные на площади 1 км<sup>2</sup>. Это позволяет даже при расстоянии между АЧТ до 600 м поддерживать уровень подавления ~0,01 ливней, индуцированных КЛ при энергии 100 ТэВ. Чувствительность обсерватории TAIGA по локальным источникам в диапазоне энергий 30 – 200 ТэВ ожидается на уровне 10-13 эрг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> на 500 часов наблюдения или 10 зарегистрированных событий. Сравнение чувствительности существующих и планируемых установок показывает, что чувствительность обсерватории TAIGA по регистрации гамма-квантов с энергиями выше 100 ТэВ сравнима с самыми амбициозными проектами LHAASO и СТА.

### Основные научные темы обсерватории TAIGA:

- Гамма-астрономия - одним из наиболее интригующих вопросов физики астрочастиц высоких энергий является поиск галактических объектов для ускорения частиц до ПэВ-энергий (т.н. Певатронов); Спектры СВЭ известных источников: где они заканчиваются; поглощение инфракрасного излучения (ИК) и космического микроволнового фона (СМВ); диффузное излучение от галактической плоскости и местного сверхскопления.

- Физика КЛ – измерения энергетического спектра, массового состава и сечений от 10<sup>14</sup> до 10<sup>18</sup> эВ.

- Физика элементарных частиц - преобразование аксионов/фотонов; скрытые фотон/фотонные колебания; нарушение Лоренц-инвариантности; измерение сечения ядер р-воздуха; поиск явлений кварк-глюонной плазмы.

**TAIGA-IACT.** Механическая конструкция первого IACT была изготовлена в основном в ОИЯИ на основе конструкции телескопа HEGRA [21]. IACT типа Дэвиса-Коттона с азимутальной монтировкой, общей площадью зеркала 9,6 м<sup>2</sup> (34 зеркала с диаметром 0,60 м каждое), угловая точность привода до 0,02°. Камера изображения массой ~ 200 кг и диаметром чувствительной зоны ~ 0,8 м [22] выполнена на основе матрицы ФЭУ со считывающей электроникой закреплена на фокусном расстоянии 4,75 м перед зеркалом. Черенковский свет ШАЛ фокусируется на камеру 34-мя зеркалами с радиусом кривизны 9,5 м. Зеркала для первого АЧТ были получены от «Галактика» (Армения), зеркала для второго АЧТ от «Медиа Ларио Индастриз» (Италия).

Камера телескопа состоит из 560 ФЭУ типа XP1911 диаметром 19 мм. Поле зрения одного пикселя составляет 0,36°. Поле зрения камеры составляет 9,6°. [23]. PSF = 0,07°. ПЗС-камера Prosilica GC1380 установлена на расстоянии 1 м от оптической оси телескопа на зеркале. ПЗС-камера используется для проверки направления наведения телескопа. Она имеет разрешение 1360×1024 пикселей и поле зрения 31,4×23,6°. Каждая ось телескопа оснащена гибридным шаговым двигателем Phytрон, 17-битным энкодером.

Все ФЭУ в камере распределены по кластерам, по 28 ФЭУ в каждом. Основу электроники кластера составляет 64-канальная ASIC MAROC-3. Каждый канал микросхемы MAROC-3 включает в себя предусилитель с регулируемым коэффициентом усиления, зарядочувствительный усилитель и компаратор с регулируемым порогом. Чип имеет мультиплексированный аналоговый выходной сигнал, пропорциональный входному заряду. Аналоговый выход подключен к 12-разрядному внешнему АЦП. Сигнал от каждого ФЭУ разделяется и подается на 2 канала MAROC-3 с разницей коэффициентов усиления 30. В результате получается полный динамический диапазон 3000 фотоэлектронов. Условием формирования локального триггера кластера является превышение амплитуды в 2-х или 3-х пикселях кластера на 10 п.э. через 15 нс.

Чипу MAROC для оцифровки событий требуется сигнал с именем HOLD, который фиксирует амплитуду сигнала на аналоговом выходе в течение всего периода оцифровки сигнала АЦП. Распределение сигнала HOLD на все кластеры осуществляется платой The Fast-

\_Hold. Задача этой платы — принимать локальные триггеры от кластера и распределять их по всем кластерам камер.



Рис. 5. Первые два IACST TAIGA

В декабре 2016 года введен в эксплуатацию первый TAIGA-IACST. Второй был введен в эксплуатацию в 2019 г. и введен в эксплуатацию в январе 2020 г. Два TAIGA-IACST представлены на рис. 5, а пример события ШАЛ, измеренного обоими TAIGA-IACST, представлен на рис. 6.

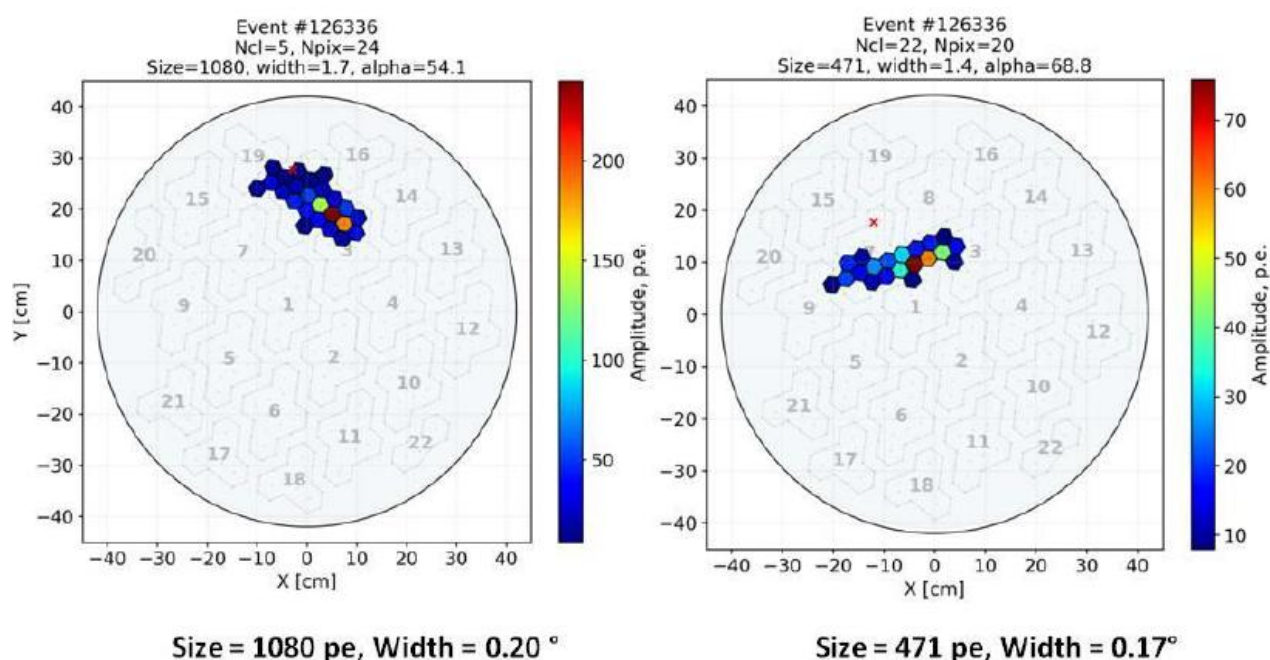


Рис. 6. Пример события ШАЛ, измеренного двумя TAIGA-IACST.

### Состояние деятельности ОИЯИ по производству и испытаниям IACST.

ОИЯИ несет полную ответственность за производство механики АЧТ, включая силовую электронику АЧТ и электронику управления движением. Зеркальные элементы для IACST#3 были куплены в специализированной компании «Media Lario Industries» (Италия). В 2019 г. в ОИЯИ был завершен комплект конструкторских чертежей и изготовлена установка АЧТ#3 для использования с камерой ССТ-1М в составе обсерватории TAIGA. На рис. 7 представлена установка IACST#3, доставленная в апреле 2020 года в Тункинский район.



Рис.7. Монтаж IAST#3 в сборе в мастерской ОИЯИ

За проектирование, испытания и производство камеры и электроники АЧТ отвечают члены коллаборации TAIGA НИИЯФ МГУ, МИФИ. Группа ОИЯИ участвует в испытаниях камерных ФЭУ IAST. Параллельно в ОИЯИ было освоено собственное производство зеркальных элементов АЧТ. Изготовлено и испытано несколько зеркальных элементов для завершения IAST#1 в Тунке, где отсутствуют 5 зеркальных элементов. Сравнение оптических параметров фасок зеркал, изготовленных в компании Медиа Ларио и ОИЯИ, представлено на рис.8. Размеры пятен обоих зеркал имеют сравнимые значения и хорошо соответствуют размеру пикселя камеры IAST. Основное отличие заключается в стоимости изготовления зеркала, которая для зеркал из ОИЯИ будет значительно дешевле.

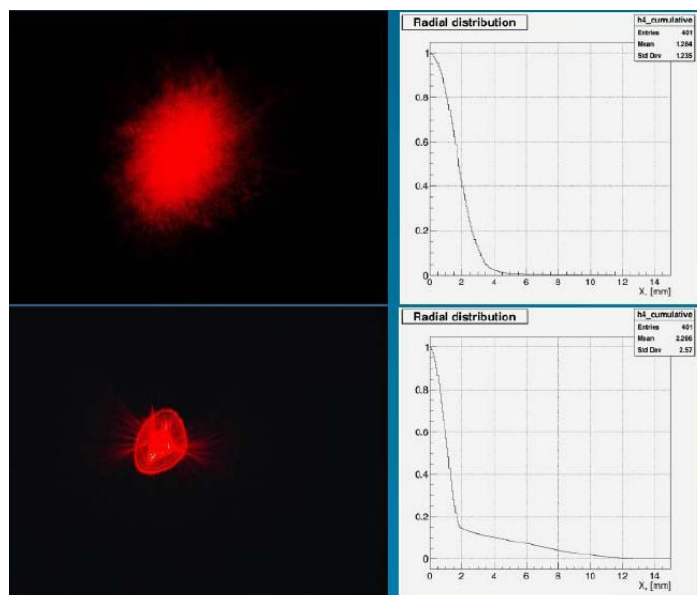


Рис.8. Сравнение оптических параметров зеркал производства компании MediaLario (вверху) и ОИЯИ (снизу).

**TAIGA-HISCORE.** В настоящее время массив TAIGA-HiSCORE состоит из 85 оптических станций, распределенных по регулярной сетке на площади  $0,7 \text{ км}^2$  с расстоянием между станциями 106 м. Каждая оптическая станция содержит четыре больших ФЭУ диаметром 20 или 25 см, а именно EMI ET9352KB или Hamamatsu R5912 и R7081. Каждый ФЭУ имеет конус Винстона диаметром 0,4 м и поле зрения 0,6 ср. Анодные сигналы всех 4-х ФЭУ станции суммируются. Это приводит к дополнительному снижению энергетического порога в 2 раза. Каждая станция соединена с центром сбора данных оптоволоконным кабелем для передачи данных и синхронизации. Стабильность синхронизации оптических станций достигает порядка 0,2 нс. Точная калибровка достигается за счет внешних источников света. Восстановление параметров ливней выполняется с использованием алгоритмов, разработанных для установки Тунка-133 [29]. Направления прихода ливней определяются относительной задержкой черенковского света на каждой станции. Это восстановленное направление используется при реконструкции ядра ШАЛ. Амплитуда импульса соответствует параметризации функции амплитуды-расстояния (ADF) [29]. Окончательное направление прихода ШАЛ, реконструированное для найденного положения ядра в предположении искривленного фронта ливня.

Угловое разрешение установки TAIGA-HiSCORE *достигает  $\sim 0,1^\circ$  для высокоэнергетических событий с числом сработавших станций более 10 и  $\sim 0,4-0,5^\circ$  для событий с более чем 4 сработавшими станциями.* Предварительный энергетический спектр КЛ, измеренный установкой TAIGA-HiSCORE, в сравнении с другими экспериментами показан на рис. 9 [30]. Энергетический порог 100% эффективности регистрации составляет около 250 ТэВ. В настоящее время экстраполяция нашего спектра на более низкие энергии не противоречит результатам прямых экспериментов в пределах их статистических погрешностей.

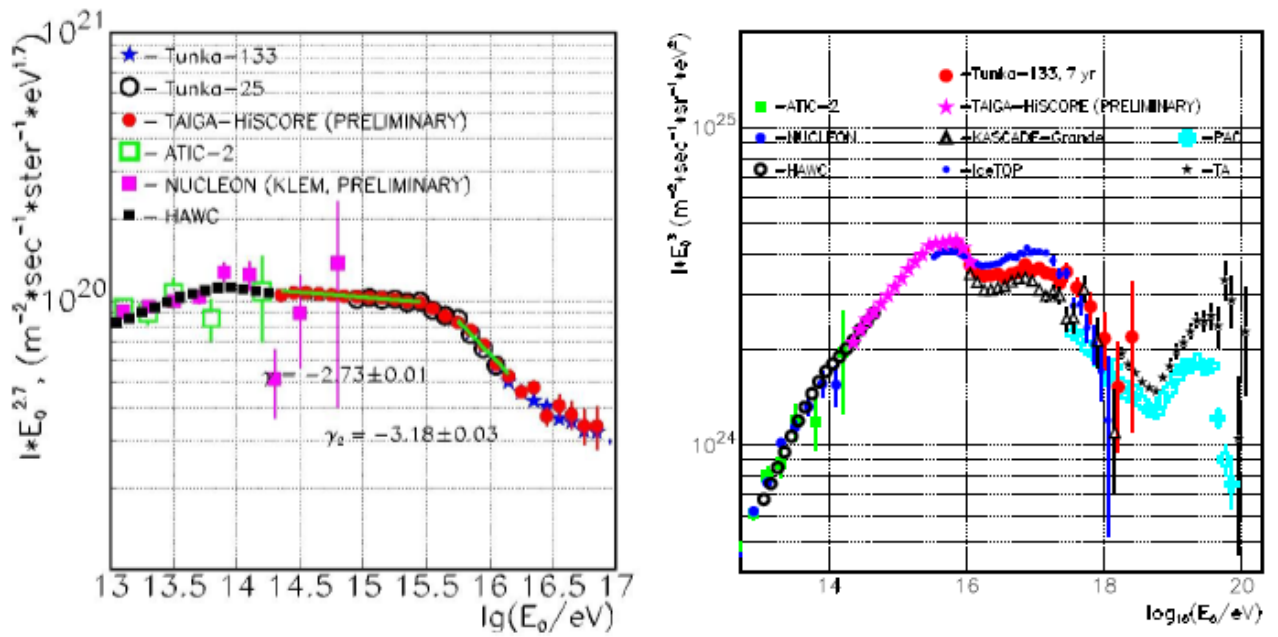


Рис. 9. Энергетический спектр первичных КЛ, измеренный установкой TAIGA-HiSCORE, в сравнении с другими экспериментами

**Первые результаты ИАСТ.** В сезоне 2019-2020 гг. наблюдения проводились в режиме «колебания» (Фомин В.П. и др., 1994, *Астрофизика частиц*, 2, 137), при котором наведение телескопа смещено от положения источника на некоторое угловое расстояние. Этот метод позволяет одновременно собирать данные и оценивать фон. Было использовано расстояние смещения  $1,2^\circ$ , направление смещения менялось между каждым 20-минутным прогоном. Точность наведения телескопа составила  $\sim 0,01^\circ$  для скорректированных наблюдений. Для анализа изображения использовался стандартный набор параметров Хилласа (Ширина, Длина, Расстояние...) (рис. 10).

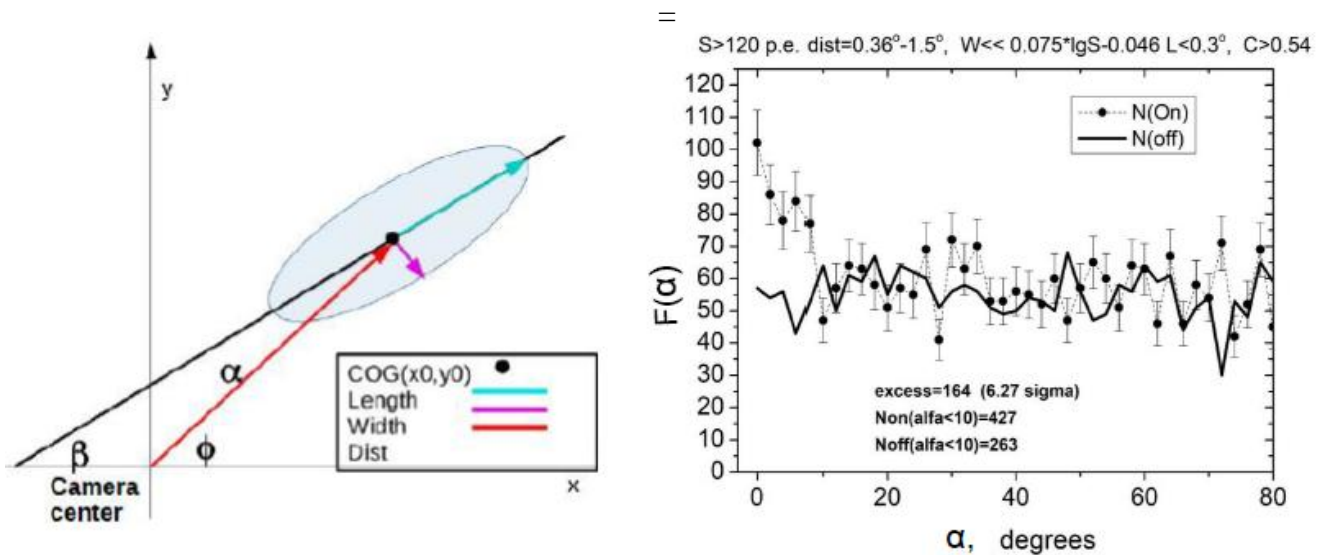


Рис.10. Слева: параметры изображений Хилласа. Справа:  $\alpha$ -распределение Крабовидной туманности ( $N(\text{On})$ , пунктирная линия) и фон ( $N(\text{Off})$ , черный) данные 46-часового наблюдения.

Крабовидная туманность с пульсаром в центре является наиболее известным и наиболее изученным источником гамма-астрономии ТэВ. Поэтому его используют в качестве эталонной свечи для калибровки гамма-телескопов. После обнаружения сигнала от Краба на теле-

скопе с более чем 5-ю стандартными отклонениями уровня значимости ( $\sigma$ ) можно считать, что телескоп сдал итоговый комиссионный экзамен.

Максимальное время полного наблюдения источника для описанного массива HiSCORE+IACTs составляет около 230 часов в год. Предполагалось, что при хороших погодных условиях в течение одного года можно достичь 100 часов времени наблюдений.

В сезоне 2019-2020 было произведено наблюдение «Краба» более 90 часов. Данные за первый период этого сезона (46 часов) уже обработаны и предварительный результат отбора событий показан на рис.11. Набор отборочных разрезов следующий: Dist:  $0,4^\circ - 1,5^\circ$ , Размер  $> 120$  PE, Ширина  $< -0,046^\circ + 0,076^\circ \times \text{Log}(\text{Размер}/1 \text{ pe})$ , Длина  $< 0,31^\circ$ , Con2  $> 0,52$ ,  $\alpha < 10^\circ$ . 8-распределение событий после отбора в течение 46 часов наблюдения Краба показано на рис. 12 как для события On, так и для Off. Избыток событий для  $\alpha < 10^\circ$  в районе 160, что составляет около  $6,2 \sigma$  по формулам Li&Ma [36].

Такой избыток согласуется с избыточной формой МК, основанной на энергетическом спектре гамма-лучей Краба, измеренном экспериментом HEGRA  $\sim 145$  событий за 46 часов. В соответствии с МК пороговая энергия составляет  $\sim 3$  ТэВ. Столь высокий энергетический порог по сравнению с телескопом HEGRA почти такого же размера объясняется следующими причинами:

1. TAIGA-IACT на высоте 615 м над уровнем моря, HEGRA- 2200 м.
2. TAIGA-IACT – самый северный черенковский телескоп, зенитный угол событий от Краба может быть только больше  $29^\circ$ .
3. Эффективная площадь зеркал  $6,0 \text{ м}^2$  (5 зеркал еще не установлены на момент наблюдения, 30% света теряется на срезах конусов Винстона). Планируется увеличить эффективную площадь зеркала до  $9,0 \text{ м}^2$ . В этом случае энергетический порог снизится до 2 ТэВ.

**Первые гибридные результаты TAIGA-IACT и TAIGA-HiSCORE.** Поиск совместных событий, зарегистрированных телескопом и установкой TAIGA-HiSCORE, проводился при слежении за Крабовидной туманностью [37]. На рис. 11 показан пример совместного адроподобного события, зарегистрированного телескопом и TAIGA-HiSCORE. Звездочкой отмечена проекция положения ядра ШАЛ на плоскость камеры телескопа с введением масштабного коэффициента  $R_p \text{ (см)} / R_c \text{ (см)} = 1500$ , где  $R_p$  — расстояние от телескопа до положения ядра ШАЛ, а  $R_c$  расстояние между центром камеры и звездочкой. Линия на картинке направлена к ядру ШАЛ. Для событий, исходящих от источника, на который ориентирован телескоп, линия, соединяющая проекцию оси ШАЛ и центр тяжести изображения, должна пересекать центр камеры. Это же событие было зарегистрировано 15 станциями установки TAIGA-HiSCORE:  $E = 840$  ТэВ,  $\theta = 30.1^\circ$ ,  $\varphi = 33.6^\circ$ ,  $R_p = 134$  м, угол между направлением ливня, восстановленным по временной установке, и направлению наведения телескопа  $0,47^\circ$ .

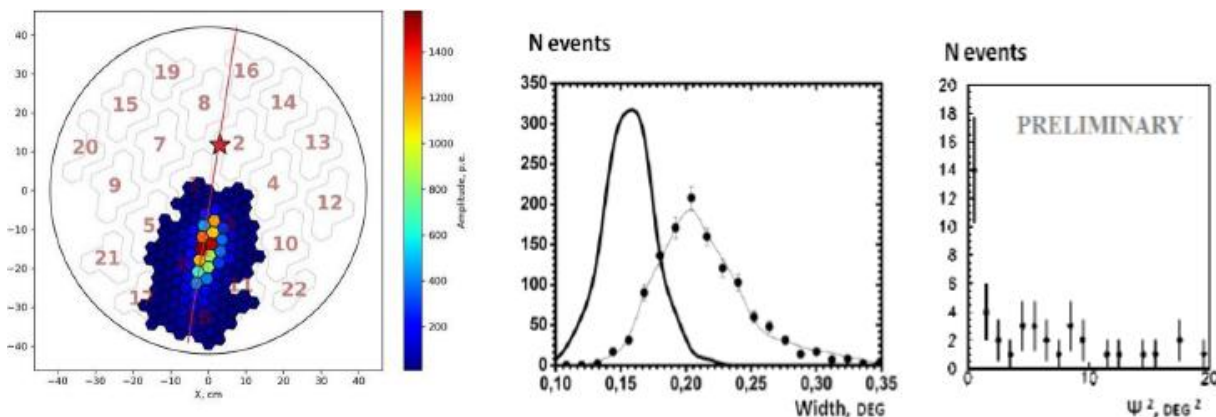


Рис. 11. Слева: пример адроподобного совместного события. Параметры изображения: Размер=18500 п.э., Ширина= $0,4^\circ$ ,  $\alpha=11^\circ$ . Посередине: распределение ширины изображения для совместных событий. Сплошные круги — эксперимент. Тонкая сплошная линия - МК (космиче-

ские лучи), толстая сплошная линия - MC (гамма-кванты). Справа: распределение  $\Psi^2$  для гибридных событий после срезов (предварительные результаты).

17 000 совместных событий с размером изображения  $\geq 60$  ф.э. были выбраны. Эти события были зарегистрированы первыми 30 станциями установки TAIGA-HiSCORE площадью  $0,25 \text{ км}^2$ . На рис. 12 показаны распределения ширины для совместных событий размером от 1000 до 3000 п.э. Тонкой сплошной линией показаны модели МК для аналогичной выборки событий, полученные из эксперимента. Сплошная толстая линия на этом рисунке — распределение ширины гамма-квантов для указанного образца. Выбрав 60% гамма-событий ( $\text{Width} < 0,17^\circ$ ,  $\alpha < 15^\circ$ ), мы подавили адронный фон в 100 раз. После применения обрезания по ширине ( $< 0,17^\circ$ ),  $\alpha$  ( $< 15^\circ$ ) и  $\text{Dist.} (< 2,5^\circ)$ , осталось 42 события с  $\Psi < 4.5^\circ$ ,  $\Psi$  - угол между направлением ливней, реконструированным TAIGA-HiSCORE, и направлением на Крабовидную туманность. Распределение  $\Psi^2$  этих гибридных событий после обрезания представлено на рис. 11. Следует отметить, что для таких энергий кратность попаданий станций HiSCORE составляет всего 4-5, а угловое разрешение равно  $0,4^\circ - 0,5^\circ$ . Для 14 из этих событий с энергиями от 45 до 60 ТэВ. Эти события можно рассматривать как предварительных кандидатов на первые гамма-подобные события, отобранные гибридным подходом.

**MC моделирование совместной работы TAIGA-HiSCORE и IACTs [32,33].** Моделирование данных телескопа проводилось в два последовательных этапа: во-первых, моделирование ШАЛ с помощью пакета программ CORSIKA [34], во-вторых, вычисление количества результирующих черенковских фотонов, которые отражаются зеркалом телескопа. Входными данными от неизображающего детектора являются параметры, которые были получены из относительных времен прихода фотонов, зарегистрированных разными детекторными станциями: первичная энергия, направление и положение ШАЛ. Направление первичного гамма-излучения фиксируется в соответствии с положением исследуемого точечного источника, а угол моделируемых фоновых протонных ливней варьировался в пределах  $0,4^\circ$  вокруг этого направления, что значительно превышало фактическое угловое разрешение прибора. Для каждого ШАЛ в банке данных были рассчитаны разные параметры изображения в АЧТ, и для каждой конфигурации этих параметров был рассчитан коэффициент подавления фона:

$$Q = \varepsilon_\gamma / \sqrt{\varepsilon_{\text{proton}}}$$

где  $\varepsilon_\gamma$  и  $\varepsilon_{\text{proton}}$  — доля событий, классифицированных как гамма-события из выборок истинных гамма-событий и протонных ливней соответственно. Для исследования изображений IACT используются стандартные параметры Hillas [35]. Включение дополнительных параметров из-за зависимости амплитуд пикселей от времени продолжается.

Оптимальные параметры неизображающих детекторов должны сочетаться с параметрами АЧТ, это все три исследуемых параметра: энергия, положение оси ливня и направление ШАЛ. Оптимальный способ совмещения этих двух групп параметров — отображающих и не отображающих — включение в процедуру разделения гамма от протонов.

Как следует из зависимости амплитуды от расстояния до оси, для эффективногоразделения гамма-ливней до  $\sim 450$  м в гибридной установке можно успешно использовать только один АЧТ. Эта ситуация отличается от автономного АЧТ, когда расстояние  $\sim 100-150$  м является предельным. Поэтому расстояние между двумя и более АЧТ (при их наличии) как частей гибридной установки может быть значительно больше, чем в стереоскопической системе АЧТ. В частности, местонахождение второго АЧТ в TAIGA на расстоянии  $\sim 300$  м от первого.

Согласно планам на 2021-2023 годы. Было запланировано развернуть дополнительно около 40 оптических станций HiSCORE (100 станций на площади  $1 \text{ км}^2$ ). Установлено четыре монтажки АЧТ. В настоящее время в ОИЯИ идет изготовление пятого АЧТ с целью его установки в Тункинской долине после общих комплексных механических испытаний в цехе ОИЯИ. Планируется установить этот телескоп в июле-августе 2023года в Тунке.

## **2021.**

1. Моделирование МК совместной работы телескопа IACT и широкоугольной установки Tunka-HiSCORE и оптимизационный подход к подавлению фона в событиях.
2. Провести мониторинг наиболее ярких источников гамма-излучения прототипом обсерватории TAIGA в гибридном режиме (совместное наблюдение HiSCORE и IACT). Модернизация программного обеспечения для анализа данных IACT.
3. Исследование гамма-излучения Крабовидной туманности в диапазоне энергий 2 – 10 ТэВ (при автономной работе телескопа) и подтверждение тем самым корректности методик телескопа и обработки данных. Наблюдение ярчайших внегалактических источников гамма-излучения МРК-421, МРК-501.
4. Ввод в эксплуатацию третьего АЧТ.
5. Изготовление зеркальных элементов АЧТ для четвертого АЧТ (приобретены в Армении).
6. Проектирование, изготовление и испытания четвертой механики АЧТ в цехе ОИЯИ.

## **2022.**

1. Сопоставительный анализ данных прототипа TAIGA и моделирования МС. Выбор оптимальное расстояние между IACT.
2. Поиск гамма-квантов с энергией более 30 ТэВ от источников Мкр-421 и Мкр-501 в гибридном режиме наблюдения.
3. Участие в сборе данных в Тунке и анализе данных.
4. Ввод в эксплуатацию четвертого АЧТ.

## **2023.**

1. Участие в сборе данных в Тунке и анализе данных.
2. Мониторинг галактических источников гамма-излучения.
3. Поиск внегалактических ELB и аксиноподобных частиц на основе наблюдений высокоэнергетического края гамма-спектра от Мкр-421.
4. Подготовить детальный проект расширения прототипа до полноценной гамма-обсерватории TAIGA.

### **Сложности:**

1. Согласно плану, бюджет проекта TAIGA составил 60 тыс. \$ на 2020 год для четвертого производства IACT. В марте 2020 г. было доступно ~ 30%. С таким бюджетом, как сейчас, выполнить наши планы будет невозможно без дополнительного финансирования.
2. В настоящее время доступно ~300 ФЭУ для четвертого IACT. Этого недостаточно и в настоящее время неизвестно, где будут получены дополнительные 300 ФЭУ.

### **2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.**

#### **Полученные за последние три года результаты**

За период с 2019 по 2022 гг, в период развертывания установки, проведено наблюдение и поиск высокоэнергичных гама-квантов от 6 источников: 2-ух внегалактических: Маркарян 501 (Mrk501), Mrk421, 2-х пульсарных туманностей: Крабовидная туманность, DragonFlyNebula и остатка сверхновой Бумеранг G106.3+2.7, которая также содержит пульсарную туманность, как предполагается, образовавшуюся при том же взрыве сверхновой, как и остаток G106.3+2.7. Во всех этих источниках ожидалось обнаружить высокоэнергичное излучение в районе 100 ТэВ (кроме Mrk421). К настоящему времени удалось исследовать гибридным методом (IACT+HiSCORE) только источник Крабовидная Туманность, поскольку конуса станций HiSCORE направлены именно на этот источник.

#### **Энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности по данным первого Атмосферного черенковского телескопа (АЧТ)**

Гамма-источник в Крабовидной туманности наблюдался первым атмосферным черенковским телескопом в течении 150 часов в течение двух сезонов (2019-2020 и 2020-2021) выделены 618 событий от гамма-квантов в энергетическом диапазоне 5-100 ТэВ. Уровень значимости такого числа событий над фоном заряженных космических лучей составляет 12



сигма (рис.12). Разработана методика восстановления энергии гамма-квантов по данным только одного атмосферного телескопа. При восстановлении энергии частиц использовалась процедура, настроенная по М-К расчетам, приводящая к **точности определения энергии около 30%**, и позволяющая восстановить энергетический спектр событий (рис.13). Полученный спектр частиц достаточно хорошо совпадает с мировыми данными в области от 5 до 100 ТэВ

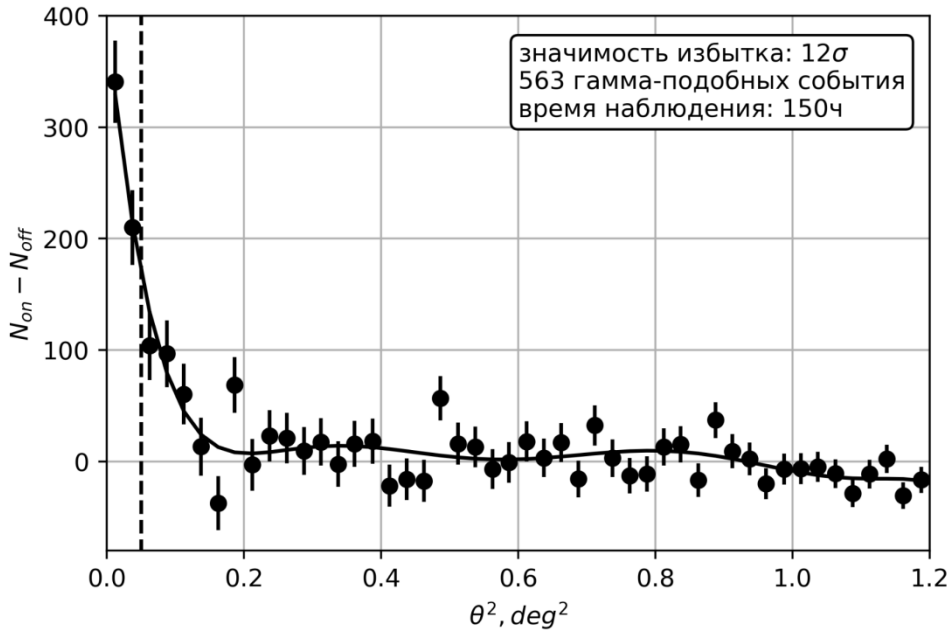


Рис.12 Распределение по параметру  $\Theta^2$  ( $\Theta$ - угол между направлением на источник и направлением прихода данного события)

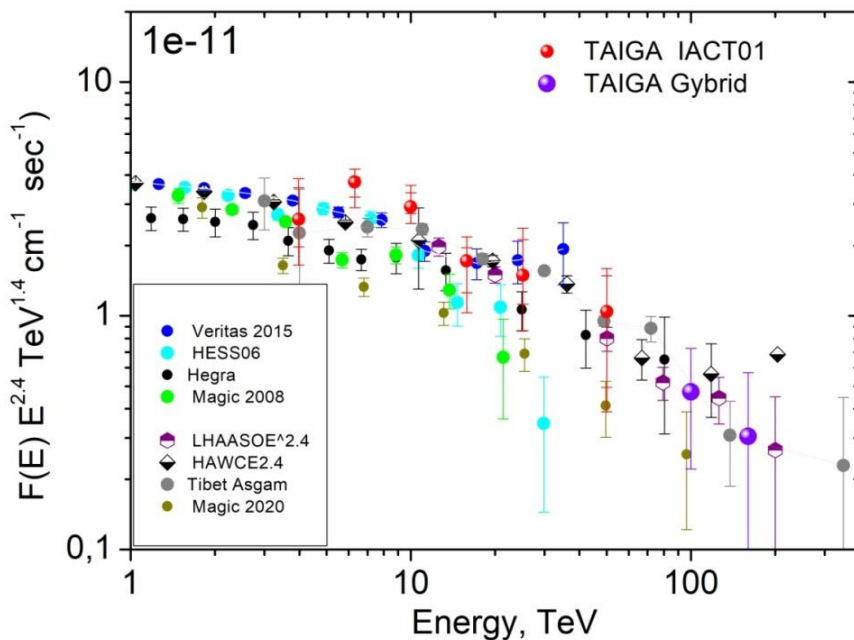


Рис.13. Восстановленный спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности по данным первого телескопа эксперимента TAIGA в сравнении с результатами измерений других обсерваторий за 150 часов наблюдения. Две последние точки получены по гибридным событиям (IACT01+HiSCORE).

### Гибридные события при наблюдения Крабовидной туманности.

Общая статистика выбранных гибридных событий за два сезона наблюдения за «Крабом» составляет ~150 000 (АЧТ01 + HiSCORE ) за время ~ 150 часов. Для каждого события определялся параметры Хилласа, рассчитанный как два набора параметров "On" и "Off" слежения за источником и слежение за фоном, а избыток находится после подавления фона адронов как разница этих двух выборок, также и спектры гамма-подобных ливней строятся как разница спектров "On" и "Off".

При анализе гибридных событий дополнительно включаются такие параметры, как расстояние до оси ливня (Rtel), угол между восстановленным направлением ШАЛ и направлением на источник и восстановленный по данным установки TAIGA-HiSCORE энергии. Критерии подавления фона в гибридных событиях позволяют собирать события с очень больших расстояний – до 400 м. Поэтому в гибридных событиях эффективная площадь оказывается на порядки больше, чем при работе 1 телескопа, пороговая энергия для гамма-квантов оказывается очень высокой – около 60-80 ТэВ из-за высокого энергетического порога регистрации станций TAIGA-HiSCORE. В анализе использовались данные только четверти установки, площадью 0.25 км<sup>2</sup>. За 150 часов было выделено 6 гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ (рис.3). Таким образом, по данным всей установки TAIGA-HiSCORE и 3 телескопов, можно ожидать **20-30 событий с энергией выше 100 ТэВ от Крабовидной туманности за 150 часов наблюдения.**

### Спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности в стерео режиме

Наблюдения Крабовидной туманности в стерео-режиме проводились первыми двумя телескопами установки TAIGA-IACT с октября по февраль сезона 2020-21. Анализ подразумевает стандартный расчет параметров Хилласа для каждого события (относительно 7 положений фона и одного источника), а также расчет дополнительных параметров, необходимых для проведения стереоскопической реконструкции геометрии ШАЛ. За 36 часов наблюдения был получен сигнал со значимостью на уровне 5σ и восстановлен энергетический спектр (рис 14), находящийся в хорошем согласии с данным высокогорных установок HAWC и LHAASO

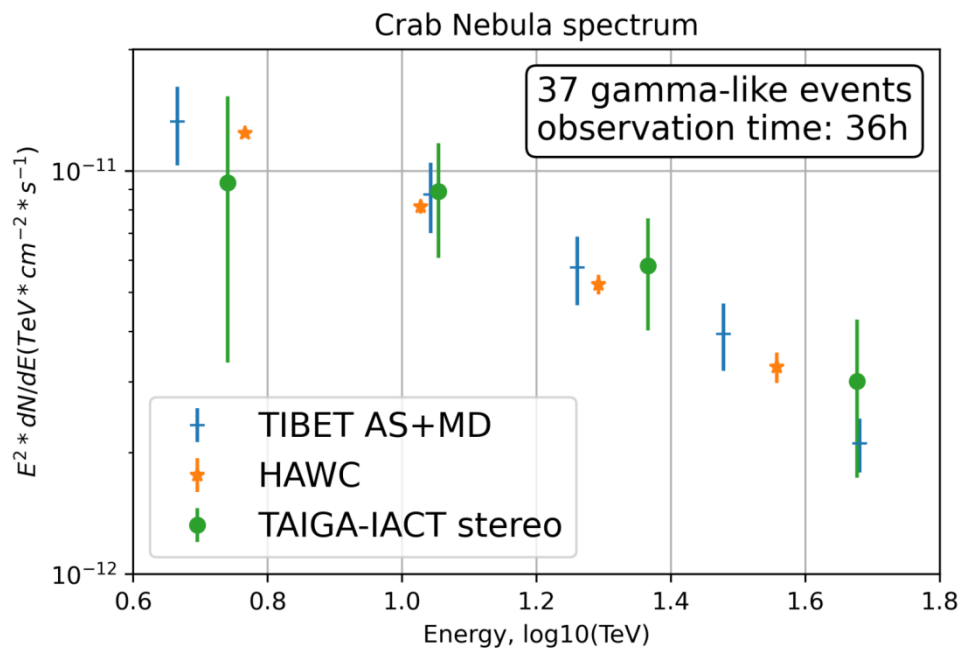


Рис.14 Энергетический спектр гамма-квантов, восстановленный стерео-методом.

## Гамма -кванты от блазаров Mkn421 и Mkn501

Первый внегалактический источник от которого был зарегистрирован сигнал в эксперименте TAIGA - это блазар, расположенный недалеко от Земли ( $Z \sim 0.03$ ) с переменной интенсивностью, хорошо измеренный в ТэВ-ном излучении, но не ожидалось высокоэнергичных событий более 20 ТэВ. Экспозиция Mkn421 в Тункинской долине в сезоне 2019-2020 составила с ноября по конец февраля 62 часа с хорошей погодой. На Рис. 15 представлено распределение по alpha для 'On' событий и для 'Off' событий с шагом  $4^\circ$ , отобранных по оптимальным критериям

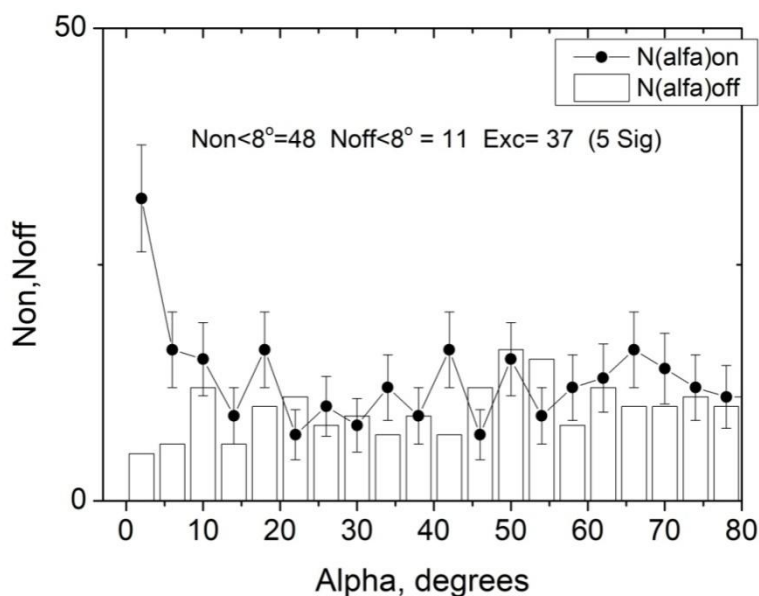


Рис. 15. Распределение по параметру  $\alpha$  для 'On' и для 'Off' событий от блазара Mkn421, отобранных по следующим критериям :  $\text{Size} > 172$  ф.э.;  $\text{dist} = 0.5^\circ - 1.25^\circ$ ,  $0.024^\circ < \text{Width} < 0.068^\circ \times \lg \text{Size} - 0.045^\circ$ ,  $\text{Length} < 0.31^\circ$ ,  $\text{Con2} > 0.44$ .

В области  $\alpha < 10^\circ$  зарегистрировано 37 ливней со значимостью  $5.77\sigma$ , а в области  $\alpha < 6^\circ$  Exc=141 событие со значимостью около  $5\sigma$ , при пороговой энергии около 3 ТэВ. Наблюдение проводилось по данным работы IACT01.

Блазар Mkn 501, находится на расстоянии от Земли  $z=0.034$ . К настоящему моменту обработаны и проанализированы данные 2019-2020 с марта по май. Полное время наблюдений в этот период составляло  $\sim 27$  часов. Для выделения гамма-подобных ливней применялся подход, оттестированный на регистрации излучения от Крабовидной туманности. Избыток составляет около 30 событий. Но значимость не высокая - около  $2.5\sigma$ .

### Пульсарная туманность Dragonfly

Это пульсарная туманность в области известного созвездия Лебедя, в котором идет процесс звездообразования. Туманность создана и подпитывается энергией вращения пульсара PSR J2021+3651. Она характеризуется высокоэнергичным ТэВ-ным излучением, обнаруженным ранее VERITAS и HAWC: в области 10 ТэВ интенсивность излучения сравнима с излучением Краба, но экспоненциально убывает при энергии более 37 ТэВ, хотя наблюдаются и события в области 100 ТэВ. Поэтому этот источник рассматривается как один из наиболее перспективных. Обработка данных этого источника проводилась в стерео-режиме. Полное часов наблюдения 40. Суммарно по двум выборкам с разными углами зарегистрировано 144 ON-события и 100 OFF-событий, избыток составил 44 события, а с учетом выбора 5 фоновых точек, это соответствует значимости  $3.37\sigma$ .

### Поиск гамма-квантов высокой энергии от источника Boomerang

За 3 сезона наблюдения 2019- 2022 годов набрано около 140 часов наблюдения источника для IACT01 и около 100 часов IACT02. С астрофизической точки зрения это очень интересный

источник. Предполагается, что пульсарная туманность, связанная с пульсаром J2229+6114, и остаток сверхновой (SNR) G106.3+2.7 являются результатом одного и того же взрыва сверхновой, поскольку вся структура расположена на краю пузыря I с расширенными областями молекулярного газа внутри и размером около 800 пс, а взрыв сверхновой произошел в области активного звездообразования. В экспериментальном плане интересен ее спектр, измеренный в экспериментах Милагро и HAWC, измеренная интенсивность в области 100 ТэВ сопоставима с интенсивностью от Крабовидной туманности. Однако, в области около 5-10 ТэВ она на порядок ниже. По сделанным оценкам должно было наблюдаться порядка десятка частиц в высокоэнергичной области.

### Монте-Карло расчеты отклика телескопа и их экспериментальная калибровка

В эксперименте TAIGA моделирование ШАЛ выполняется с помощью пакета CORSIKA версии 7.35 с моделью QGSJET-II-04 для высокоэнергетических взаимодействий и GHEISHA-2002d для низкоэнергетических взаимодействий.[16]. Определялся набор параметров изображений, позволяющий наиболее эффективно подавить фон и зарегистрировать гамма-кванты. Один из наиболее важных для восстановления энергии ШАЛ параметр - коэффициент перехода от числа фотоэлектронов в изображении  $size$  к потоку фотонов  $I$  (фот/м<sup>2</sup>), падающих на зеркала телескопа,  $R = size/I$ . В расчетах Монте-Карло оценки этого коэффициента ( $R_{M-K}$ ) связаны с рядом неопределенностей (отражение света от зеркал, учет прохождения света через входное окно камеры, отражение света от конусов Винстона, квантовая чувствительность фотоумножителей и т.д), поэтому необходима независимая оценка этой величины. В эксперименте TAIGA величина отношения  $size$  к потоку фотонов ( $R_{эксп}$ ) получена по гибридным событиям, зарегистрированным телескопом и станциями HiSCORE. Для таких событий известна энергия  $E$ , восстановленная по плотности фотонов на расстоянии 200 м от оси ШАЛ, и функция пространственного распределения фотонов (ФПР), восстановленная по данным станций HiSCORE, с точностью около 10% [17]. По ФПР можно получить число фотонов в точке положения телескопа  $I$ , сравнить с числом фотоэлектронов в изображении, регистрируемом телескопом, и получить величину отношения  $R_{эксп} = size/I$ . Коэффициент, полученный по банку событий оказался равным  $R_{эксп} = 0.56 \pm 0.03 + 0.07 \text{ сист.}$ . В Монте-Карло расчетах  $R_{M-K} = 0.63 \text{ р.е.} \pm 0.03$ , что в пределах ошибки согласуется с экспериментальным значением и подтверждает правильность выполненного моделирования. Пример гибридного события приведен на рис. 16 А. Черные точки – экспериментально измеренные ФПР по станциям HiSCORE, сплошная линия – аппроксимация этой ФПР, квадрат – поток света в точке расположения телескопа. Распределение по коэффициенту  $R_{эксп}$  приведено на рис. 16 Б.

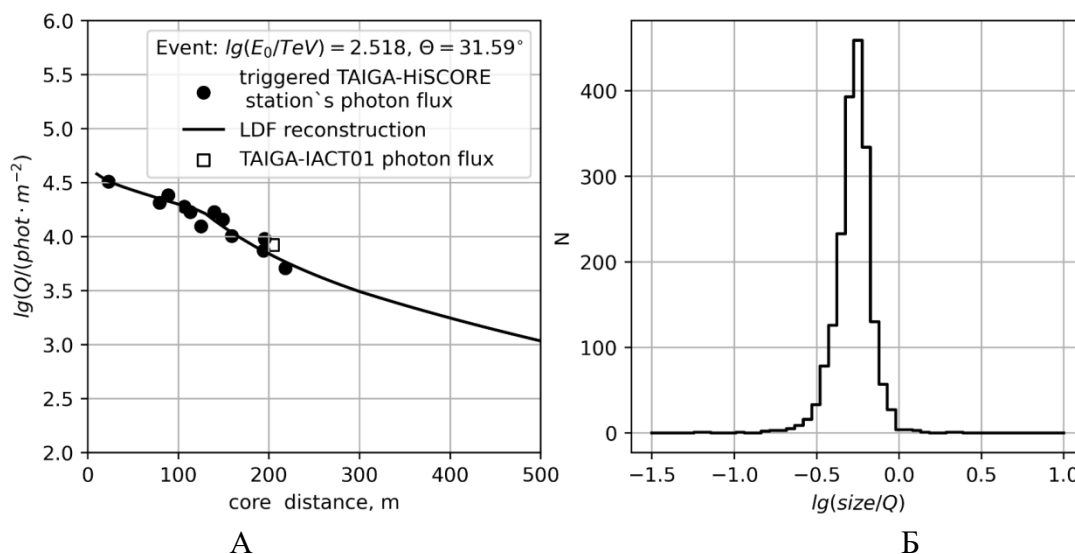


Рис.16

А: Пример гибридного события. Черные круги – экспериментальные точки ФПР по станциям HiSCORE, сплошная кривая – аппроксимация этой ФПР, черный квадрат – поток света в точке

света в точке расположения телескопа, пересчитанный из события зарегистрированного телескопом с коэффициентом  $R_{M-K}=0.63$

Б Распределение по коэффициенту  $R_{\text{эсп}}$

### 3. Программа развития астрофизического комплекса

Ближайшее развитие астрофизического комплекса TAIGA связано с созданием еще двух атмосферных черенковских телескопов и существенное увеличение площади мюонных детекторов (установка TAIGA-MUON).

Один из недостатков гибридного подхода в существующем варианте астрофизического комплекса является существенное различие между угловой апертурой черенковских телескопов и апертурой установки TAIGA-HiSCORE, приводящие к возможности наблюдения в данный момент времени только одного источника. Для исправление этой ситуации, планируется создать малые изображающие черенковские телескопы (SIT) с угловой апертурой 25-30 градусов и энергетическим порогом 80-100 ТэВ. Совместная работа таких телескопов и установки TAIGA-HiSCORE почти в 10 раз увеличит число гибридных событий, для которых возможно выделение гамма-квантов на фоне событий от космических лучей. Дальнейшее развитие астрофизического комплекса, скорее всего в другом месте, связано с расширением установки TAIGA-HiSCORE на площадь в 10 раз большую и дополненную малыми изображающими черенковскими телескопами.

#### Черенковские телескопы

В ОИЯИ изготовлена механическая часть четвертого черенковского телескопа, отправлена и смонтирована на полигоне. Три телескопа работают в плановом режиме. Выполняются плановые работы по изготовлению модернизированного пятого телескопа.



Рис17. Первый, четвертый и третий телескопы на полигоне в Тункинской долине.



Рис 18. Второй телескоп на полигоне.

Изготовлены и отправлены недостающие зеркала. Общие характеристики зеркала представлены в таблице 1.

Таблица 1. Общие характеристики зеркала

Название параметра	Значение по ТЗ	Измеренное значение
Радиус кривизны, [мм]	9500	9494±5
Диаметр зеркала, [мм]	600	600±1
Фокусное расстояние [мм]	4750±50	4747±5
Толщина зеркала, [мм]	15	14,7 <sup>+0,1</sup> <sub>-0,2</sub>
Диаметр светового пятна на половине значения интенсивности, [мм]	4,75	1,0
Материал отражающего покрытия	алюминий с защитным слоем оксида кремния	алюминий с защитным слоем оксида кремния
Коэффициент отражения в диапазоне 300-600 нм, [%]	не менее 80	не измерялся

Для всех зеркал были проведены измерения фокусного расстояния и распределение энергии пятна для центра кривизны. В качестве источника света был использован полупроводниковый лазер с длиной волны излучения -640 нм. Ниже приведены данные измерения для зеркала с номером 11.

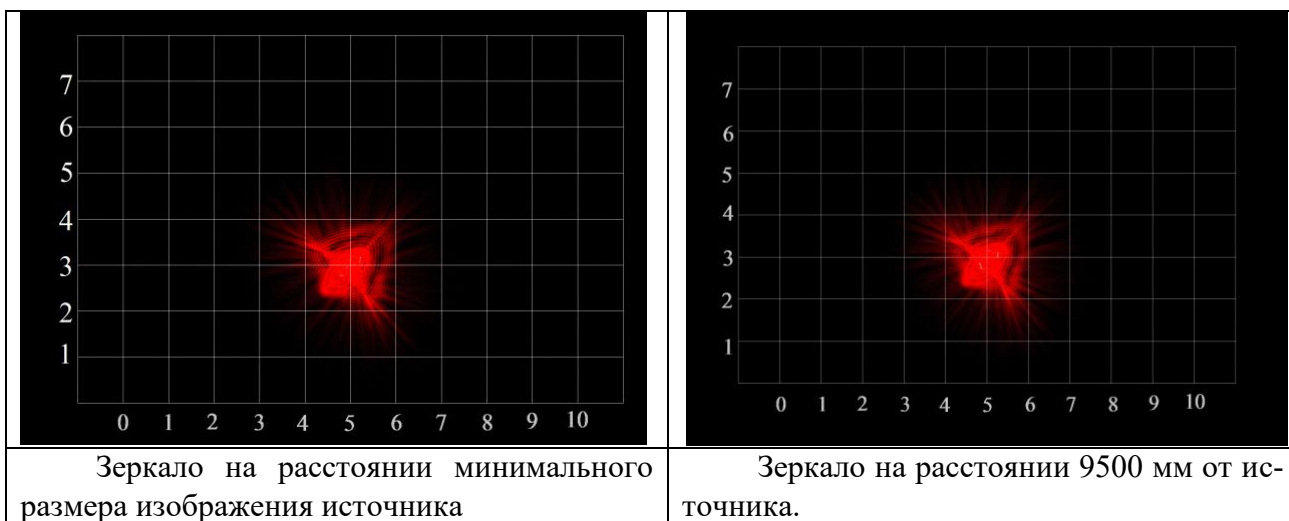


Рис 19. Распределение интенсивности светового пятна на изображении точечного источника в центре кривизны зеркала.

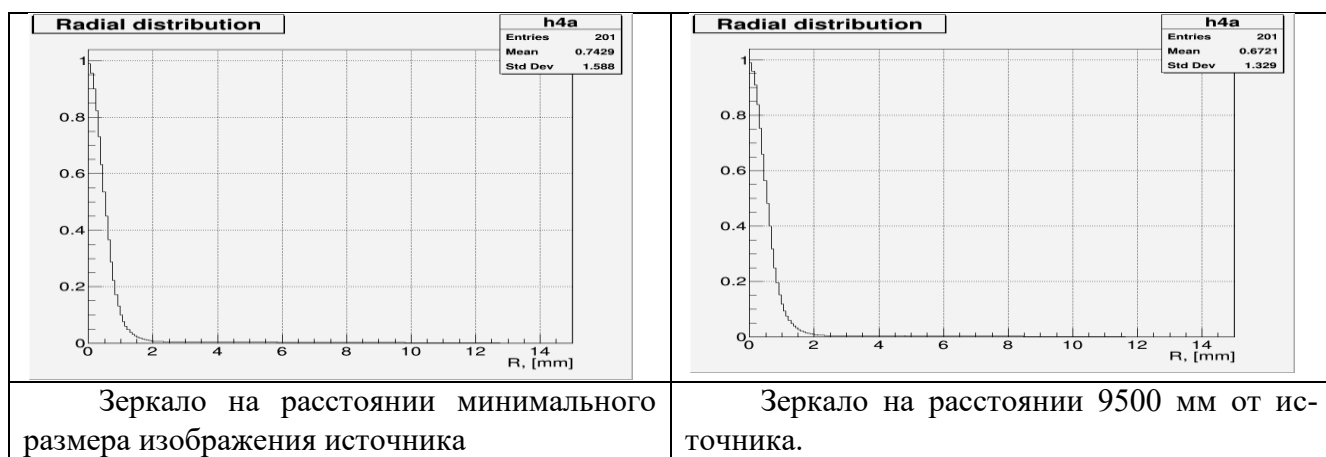


Рис 20. График распределения энергии в изображении источника в центре кривизны зеркала.

### Широкоугольный телескоп

В рамках работы по перспективным направлениям по расширению проекта TAIGA ОИЯИ участвовал в работе по обсуждению моделированию и изготовлению прототипа широкоугольного черенковского телескопа. Использование таких телескопов совместно с распределенными детекторами позволит иметь большую статистику совместных событий в области высоких энергий за счет большого поля зрения телескопа. Параметры прототипа телескопа представлены в таблице 2.

Таблица 2.

	значение
<b>Линза</b>	
Диаметр линзы, мм	<b>820</b>
Фокусное расстояние, мм	<b>3666±100</b>
Размер поля зрения максимальный, градусы	<b>±7,5</b>
Размер поля зрения максимальный, мм	<b>940</b>
Размер поля зрения используемый, мм	<b>600</b>
Положения телескопа, ° от вертикали (телескоп ориентирован на Юг)	<b>0, 35, 90</b>
<b>Камера</b>	
Поле зрения одного пикселя	<b>~ 0.4 °</b>
Количество пикселей	<b>1000 - 1200</b>

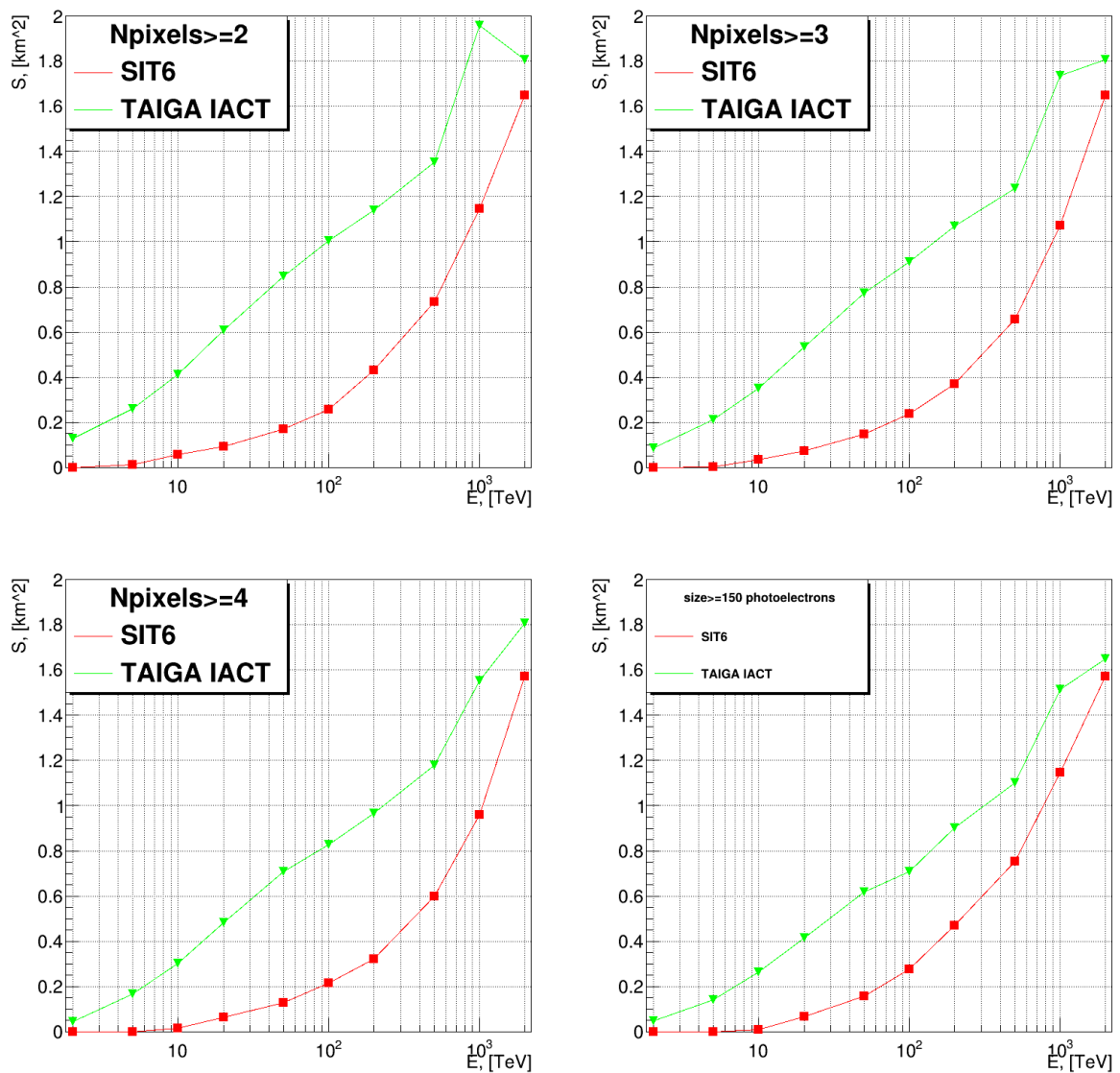
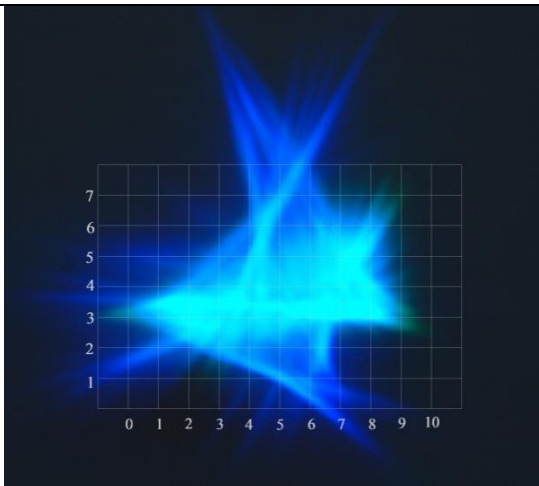


Рис 21. приведены графики сравнения эффективной площади регистрации гамма-квантов для одного телескопа ТАЙГИ и для линзового телескопа с кремниевыми фотоумножителями (SIT6) для полной матрицы фотоумножителей (2791 штук).  $N_{\text{pix}2}$  - примерно по уровню триггера (2 пикселя выше 10 фотоэлектронов).  $N_{\text{pix}4}$  и  $\text{size}150$  - 4 пикселя и 150 фотоэлектронов суммарно в событиях.

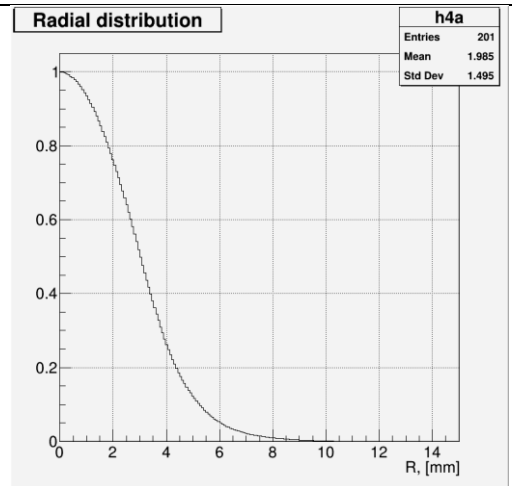
Можно отметить, что работать такой телескоп будет совместно со станциями HiSCORE, энергетический порог которых около 70 ТэВ. Таким образом видно, что в области энергий совместной работы эффективная площадь перекрывает десятки станций и может помочь анализу ШАЛ наличием пространственной картины в нескольких пикселях.

Линза для широкоугольного телескопа изготовлена в ОИЯИ. Распределение энергии пятна в центре поля зрения и на краю показано на рисунках ниже (рис. 22).

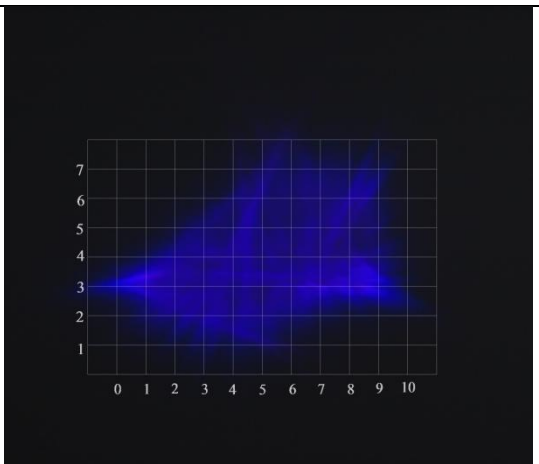




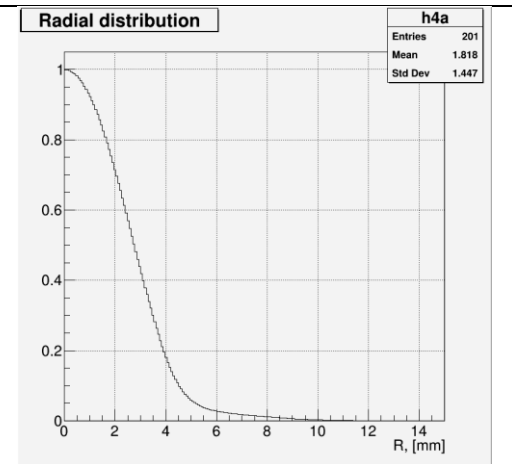
Линза на расстоянии минимального размера изображения источника №1



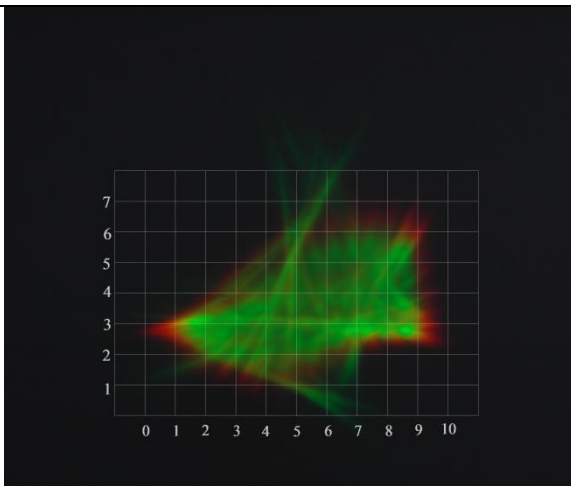
Соответствующее распределение интенсивности светового пятна по полученном изображении



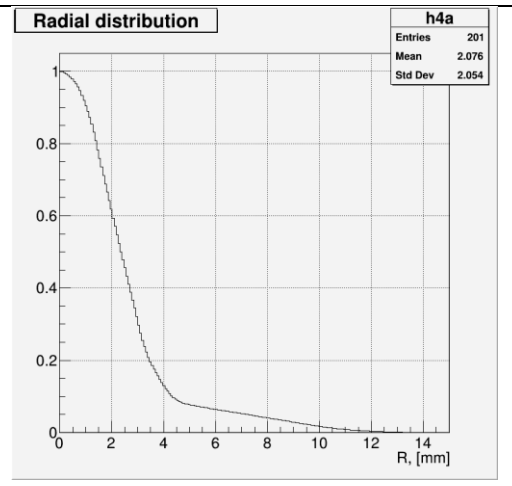
Линза на расстоянии минимального размера изображения источника №2



Соответствующее распределение интенсивности светового пятна по полученном изображении



Линза на расстоянии минимального размера изображения источника №3



Соответствующее распределение интенсивности светового пятна по полученном изображении

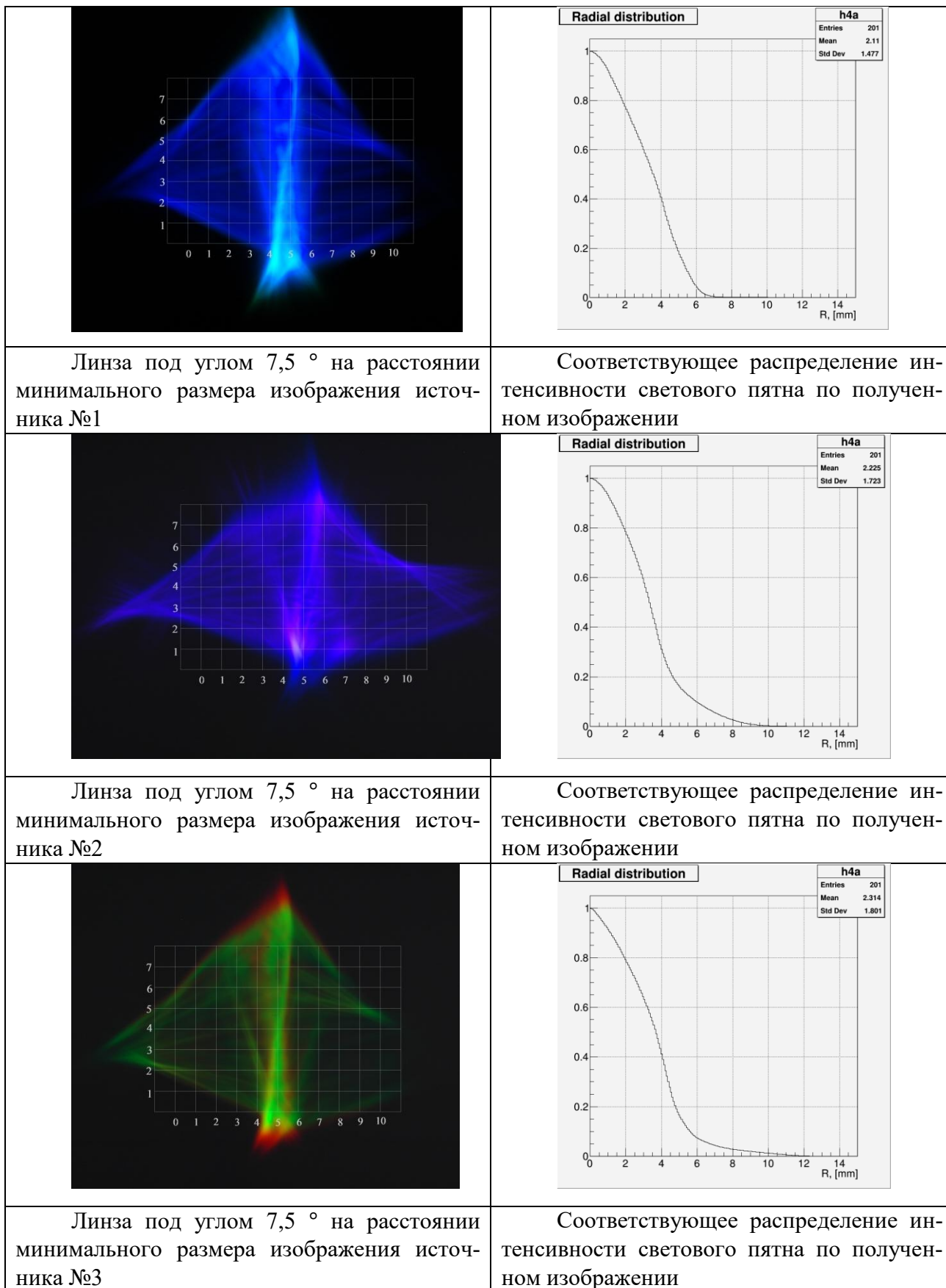


Рис 22.

Для оперативного изготовления был разработан проект телескопа с возможностью изготовления на полигоне на месте проведения наблюдений. Прототип широкоугольного линзового черенковского телескопа успешно изготовлен и установлен на Тункинском полигоне (рис 23).

В настоящее время ожидается изготовление камеры и телескоп может приступить к работе.



Рис 23. Металлический каркас механической части телескопа



Рис 24. Ферма для камеры и оптических элементов .

Изготовлены и отправлены недостающие зеркала для Телескопов. Для каждого зеркала были проведены измерения оптических параметров и изготовлены паспорта.

## Библиография

1. F.Aharonian (HESS Collaboration)//Astroparticle Physics 34(2011) 738-747
2. V.Acciari (VERITAS Collaboaration) Ap.J Letters 730 (2011) L20
3. Albert et al (MAGIC)// Astrophys.J.639:761-765,2006
4. Abdo A.A. et al.,(Milagro) 2007, ApJ 664, L91
5. A.Abdo et al. (Milagro)//arxiv: 1403.0161
6. N. Budnev et al. (TAIGA Collaboration), Jour.Phys: Conf. Series 718 052006 (2016)
7. Budnev N. et al., (TAIGA Collaboration), NIMA 845, 384 (2017)
8. Tluczykont, D. Hampf, D. Horns, L.Kuzmichev et al. Astropart. Phys., 56:42, 2014.
9. G.Di.Sciascio (LHAASO collaboration) //arXiv: 1602.07600
10. B.S.Acharya et al. (CTA collaboration) Astroparticle Physics 43 (2013) 3-18;
11. Schioppa E.J. et al. [CTA SST-1M Project Collaboration] // arXiv:1508.06453.
12. G.Sinnis. Nucl.Instrum.Meth.A623:410-412,2010
13. Home pager of HAWC: www.hawc-observatory.org
14. HAWC collaboration. Astroparticle Physics 50-52(2013) 26-32
15. Tibet AS $\gamma$  (the Tibet air-shower array) [15]
16. M. Peresano, R. Mirzoyan, I. Vovk, P. Temnikov et al. for the MAGIC Collaboration, PoS(ICRC2019)759
17. K. Malone for the HAWC Collaboration PoS(ICRC2019)734
18. K. Kawata for Tibet AS gamma Collaboration, PoS(ICRC2019)712
19. Q.An et al et// Nucl.Instrum.Meth.A644:11-17,2011
20. G.Di.Sciascio (LHAASO collaboration) //arXiv: 1602.07600
21. R. Mirzoyan et al., Nuclear Instr. And methods A351 (1994) 513-526. DOI: 10.1016/0168-9002(94)91381-1.
22. I.I. Yashin et al. (TAIGA Coll.), Journal of Physics: Conference Series 675 (2016) 032037.
23. I.I. Yashin et al. (TAIGA Coll.), PoS(ICRC2015)986.
24. H. Anderhub et al., JINST 8 (2013) P06008 [arXiv:1304.1710].
25. A. Nepomuk Otte, D. Garcia, T. Nguyen and D. Purushotham, Nucl. Instrum. Meth. A846 (2017) 106 [arXiv:1606.05186].
26. M. Heller et al., PoS(ICRC2019)694 (2019) .
27. J. A. Aguilar et al., Nucl. Instrum. Meth. A830 (2016) 219.
28. P. Rajda et al., PoS(ICRC2015)931 (2015) [arXiv:1508.06082].
29. V.Prosin et al. (Tunka Collaboration) NIM A 756, 94 (2014)
30. N.Lubsandorzhev et al., PoS(ICRC2019)729.
31. Y. Sagan et al., PoS(ICRC2019)776
32. E.B. Postnikov et al. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2017, Vol. 81, No. 4, pp. 428-430
33. E.B. Postnikov, A.A,Grinyuk et al. Proceedings of ISVHECRI-2016
34. Heck D., Knapp J., et al. // Report FZKA 6019. Forschungszent. Karlsruhe. 1998.
35. Hillas A.M. // Proc. 19nd ICRC. La Jolla. NASA Conf. Publ., 1985. V. 3. P. 445.
36. Li, T.-P., & Ma, Y.-Q. 1983, ApJ, 272, L317.
37. L.Kuzmichev et al., NIM A 952 (2020 ) 161830.
38. M.Heller, A.N.Borodin et al. PEPAN Letters (2020 r.)

## ОТЧЕТ по активности «Эксперименту ОЛВЭ-HERO»

Головной организацией в подготовке эксперимента ОЛВЭ-HERO является НИИЯФ МГУ. В рамках Федеральной Космической Программы (ФКП) на 2016-2025 гг. ведется НИР ОЛВЭ-HERO. Сформулированы предложения по созданию комплекса научной аппаратуры (КНА) с общей массой до 16 тонн, при условии вывода на низкую околоземную орбиту при помощи тяжелого РН («Протон», либо «Ангара»). Данный проект, в качестве ОКР, включен в ФКП с 2021 г., с запуском в период до 2030 г.

В рамках подготовки этого эксперимента в ОИЯИ были разработаны, изготовлены и протестированы на пучках SPS в CERN прототипы борированных калориметров. Полученные результаты по измерению выхода альфа-частиц, возникающих в при поглощении тепловых нейтронов ядрами бора-10, докладывались на различных конференциях, в том числе на международной конференции ICRC-2019 в Медисоне, США.

В соответствии с темой 02-2-1125-2015/2023 ПТП ОИЯИ в 2022 году предполагалось изготовить и провести тесты прототипов установки ОЛВЭ-HERO для исследования космических лучей в диапазоне энергий  $10^{11}$  -  $10^{16}$  эВ. Аппаратура для прототипа была изготовлена и подана заявка в ЦЕРН с просьбой выделения времени для проведения теста прототипа ОЛВЭ-HERO на пучках электронов и тяжелых ионов на ускорителе SPS. Заявка ОИЯИ была удовлетворена и выделено 1 неделя пучкового времени в июне на электронном пучке и 1 неделя на пучке тяжелых ионов в ноябре. Однако ОИЯИ не получил разрешения на временный вывоз изготовленной аппаратуры ОЛВЭ-HERO в Швейцарию и запланированные тестовые сеансы не состоялись.

В связи с невозможностью проведения запланированного теста прототипа ОЛВЭ-HERO на пучке тяжелых ионов на SPS в ЦЕРН дирекция ЛЯПпопросила дирекцию ЛФВЭ дать разрешение на проведение теста прототипа на пучке ядер ксенона с энергией 3-4 ГэВ/нуклон на НУКЛОТРОНе в ноябре-декабре 2022 года в объеме 30-40 часов пучкового времени. К сожалению, выделить подходящее место на пучке не было возможности и нам предложили единственное трудно доступное место на расстоянии  $\sim 1.5$  метра от оси пучка в конце установки BM@N. Как показано на Рис.1, прототип ОЛВЭ-HERO был смонтирован в указанном месте и проведен набор данных в разной конфигурации детектора по отношению к пучку. Целью теста было определение зависимости выхода альфа-частиц из борированных детекторов прототипа от заряда первичного налетающего ядра. Однако из-за невозможности проведения точной настройки расположения детектора по отношению к пучку (confinment) полученные данные невозможно обработать и необходимо провести новый тест.



Рис.1. Прототип ОЛВЭ-HERO на пучке в районе установки BM@N

На Рис.2 представлены результаты по выходу альфа-частиц в зависимости от времени в интервале до  $4096 \cdot 4$  нс  $\sim 16$  мкс в борированных сцинтилляторах прототипа ОЛВЭ-HERO, полученные на пучке тяжелых ионов 13 ГэВ/нуклон на SPS в CERN. Система измерения зарядов (СИЗ) состоит из 4-х кремниевых детекторов и измеряет заряды  $Z$  падающих ядерных фрагментов в интервале от 200 до 2000 условных единиц. На Рис.2 представлены измеренные выходы альфа-частиц, разделенные с помощью СИЗ на легкие ( $Z < 750$  у.е. — зеленый цвет), средние ( $750 < Z < 1500$  у.е.- красный цвет) и тяжелые ( $Z > 1500$  у.е. - синий цвет). Как и следовало ожидать, выход альфа-частиц растет с увеличением заряда падающего ядра на уровне десятков процентов, что не согласуется с результатами МС-моделирования, представленного на Рис. 3, где этот рост на уровне 10-50 раз.

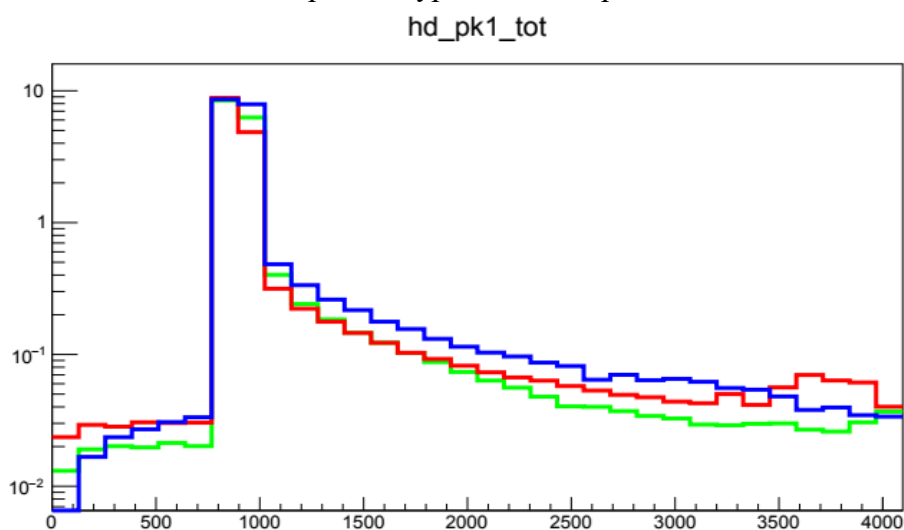


Рис.2. Выход альфа-частиц для легких, средних и тяжелых ядер с энергией 13 ГэВ/н

Для более детального анализа зарядовой зависимости выхода альфа-частиц предполагалось провести дополнительный тест прототипа на пучке тяжелых ионов на SPS в 2022, который не был выполнен из-за запрета на вывоз прототипа в CERN. Проведение теста на выведенном пучке ядер ксенона на НУКЛОТРОНе с энергией 3.5 ГэВ/нуклон оказалось также невозможным из-за отсутствия места на пучке.

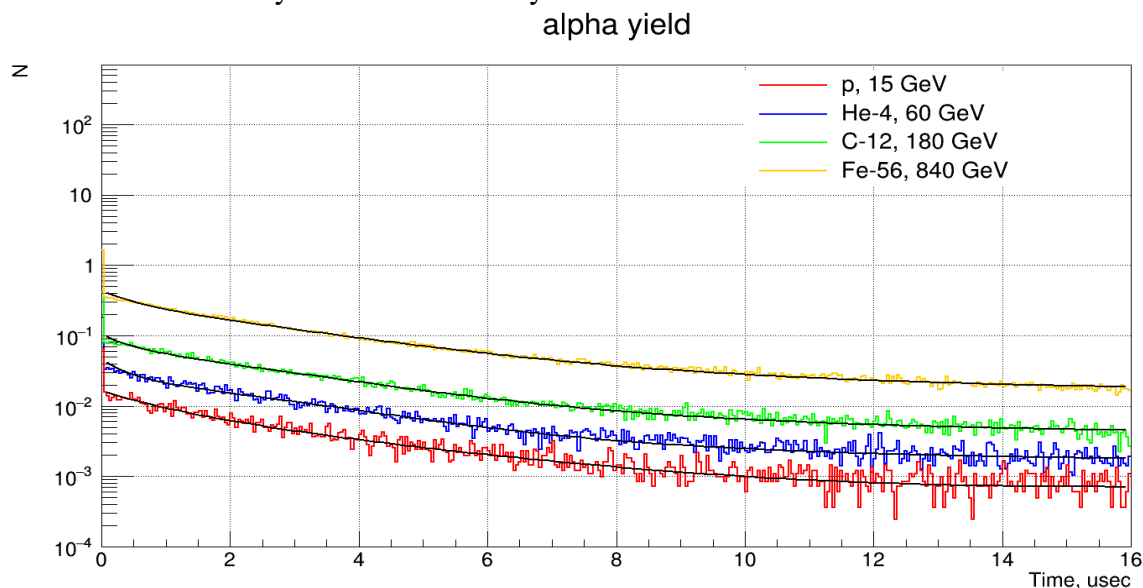


Рис.3. Монте\_Карло моделирование выхода альфа-частиц с энергией ядра 13 ГэВ/н

В настоящее время в ОИЯИ существует первый прототип детектора с борированным сцинтиллятором, который испытан на тестовых пучках SPS в ЦЕРН. В ближайшие 2-3 года предполагается спроектировать, изготовить и испытать на выведенных пучках протонов и ядер более совершенные прототипы калориметра ОЛВЭ-HERO с целью выбора окончательной конструкции аппарата.

Кроме того, проводится МС-моделирование эксперимента с целью определения фона, обусловленного поглощением тепловых нейтронов и образованием альфа-частиц, возникающих от суммарного потока КЛ  $\sim 10^5 \text{ см}^{-2} \text{ стр}^{-1} \text{ сек}^{-1}$ , которые, в свою очередь, определяют пороговую энергию чувствительности детектора. Результаты МС-моделирования докладывались на ICRC-2021 в Берлине.

Геометрия детектора приведена на Рис. 4. - протоны разыгрываются на поверхности детектора, которые хотя бы вскользь с ним взаимодействуют.

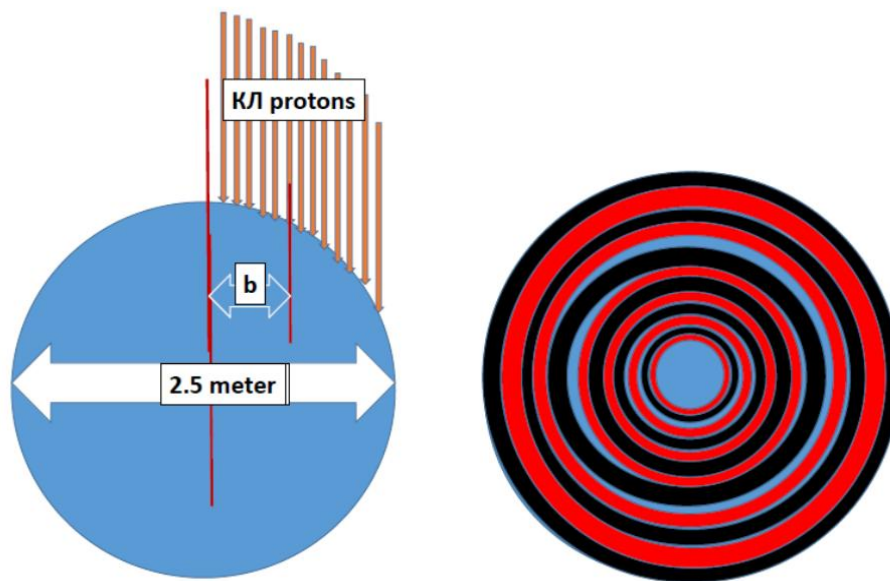


Рис.4 Геометрия детектора ОЛВЭ-HERO

На Рис.5 приведена предварительная оценка пороговой энергии чувствительности детектора ОЛВЭ-HERO. Взяты протоны с энергиями: 1 GeV, 10, GeV, 100 GeV, 500 GeV, 1 TeV и 10 TeV. Последовательно события пущены в детектор, по одному для каждой энергии, в разные моменты времени. В результате протоны с энергией ниже 500 GeV растворились в фоне. Т.е. число альфа частиц рожденных этими протонами не изменили флуктуации фона. Для оставшихся энергий результат на картинке ниже.

Красными пунктирными линиями отмечены границы фонового счета. Видно, что протоны с энергиями порядка 1 TeV и выше - видны невооруженным глазом. Протон с энергией в 500 GeV, хоть и вылезает за границы, но практически не отличим от случайных выбросов, которые видны, например в промежутке от 50000 до 60000 usec. Таким образом, нижней границей чувствительности детектора с борированными сцинтилляторами для начальных КЛ-протонов является 1 ТэВ.

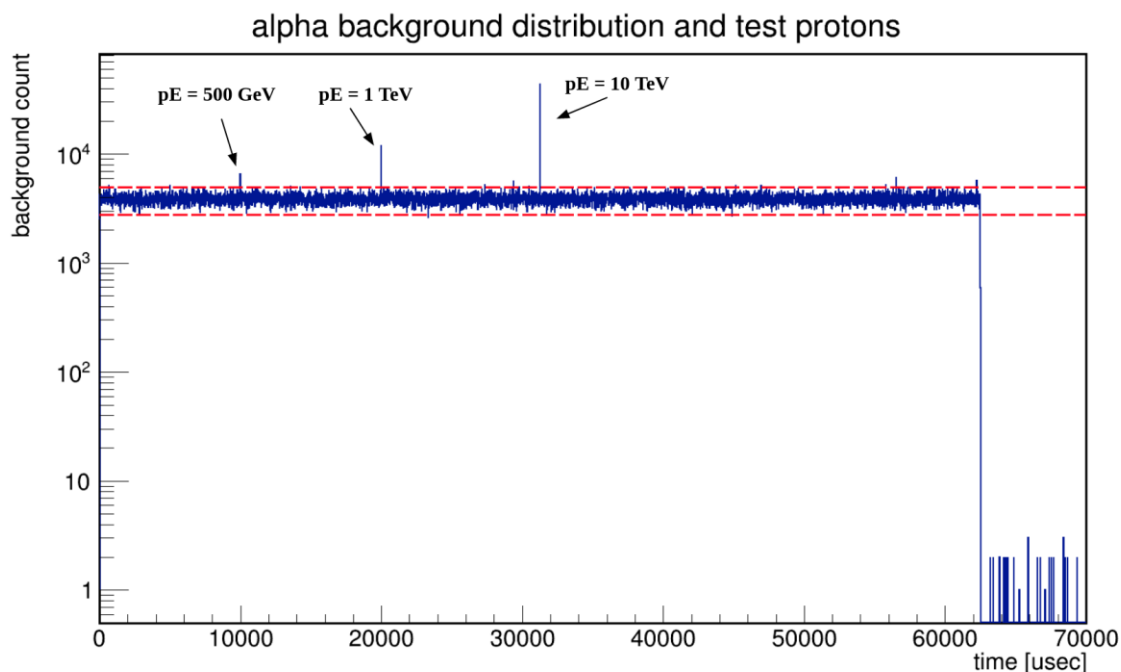


Рис.5. Предварительная оценка пороговой энергии чувствительности детектора ОЛВЭ-HERO.

#### Публикации для активности «Эксперименту ОЛВЭ-HERO»

1. The HERO project for the study of high-energy primary cosmic radiation

D.M. Podorozhnyi(Moscow State U.), E.V. Atkin(Moscow Phys. Eng. Inst.), L.S. Burylov(Watervliet Arsenal), A.G. Voronin(Moscow State U.), N.V. Kuznetsov(Moscow State U.) et al. (May 1, 2009)

Published in: Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 73 (2009) 5, 593-596, Izv.Ross.Akad.Nauk Ser.Fiz. 73 (2009) 5, 632-635 • Contribution to: 30th Russian Cosmic Ray Conference, 593-596

DOI reference search0 citations

2. New High-Energy cosmic-Ray Observatory (HERO) project for studying the high-energy primary cosmic-ray radiation

E.V. Atkin(Moscow Phys. Eng. Inst.), L.S. Burylov(Unlisted), A.P. Chubenko(Lebedev Inst.), N.V. Kuznetsov(SINP, Moscow), M.M. Merkin(SINP, Moscow) et al. (2009)

Published in: Nucl.Phys.B Proc.Suppl. 196 (2009) 450-453 • Contribution to: ISVHECRI 2008

3. Ya. Sagan et al., The OLVE-HERO calorimeter prototype beam test at CERN SPS

36th International Cosmic Ray Conference -ICRC2019-July 24th - August 1st, 2019

Madison, WI, U.S.A.

PoS(ICRC2019)141

4. I.Satyshv, A.Pan and L.G.Tkachev. Toy Monte-Carlo simulation of the OLVE-HERO detector

37th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2021) July 12th – 23rd, 2021

Online – Berlin, Germany

PoS(ICRC2021)078

5. Pan A., Grebenyuk V., Karmanov D., et al. The OLVE-HERO Calorimeter Prototype Beam Test at CERN SPS. Physics of Particles and Nuclei Letters (2020) 17(1), стр. 13-18

6. Pan A., Grebenyuk V., Karmanov D., et al. Tests of the OLVE-HERO Calorimeter Prototype at Heavy-Ion Beams at SPS CERN. Physics of Atomic Nuclei (2019) 82(6), стр. 788-794

8. Grebenyuk V., Krasnoperov A., Lavrova M., et al. The OLVE-HERO Calorimeter Prototype Tests at Heavy Ion Beams of CERN SPS. Physics of Particles and Nuclei Letters (2019) no.2, 85-92



### Отчет по активности «эксперимент ТУС»

Главной целью космического эксперимента ТУС является поиск космических лучей предельно высоких энергий ( $E > 70$  ЭэВ) с помощью измерения флуоресцентного и черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере Земли. Детектор ТУС зарегистрировал более 40 событий, происхождение которых неясно. В отличие от стандартных, в наблюдаемых событиях одинаковые сигналы возникли во всех пикселях фотодетектора, что и является критерием их аномальности. Вероятной природой таких атмосферных событий являются внепертурные грозовые разряды, диффузное отражение света которых от солнечных панелей спутника, попадает на матрицу фотодетектора.

В аномальных событиях выделяется группа из нескольких «гибридных» событий (рис.1): узкие, шириной в несколько временных тактов, пики вначале события, сопровождаемые широкими распределениями. Возможно, что узкий пик обусловлен Черенковским и флуоресцентным излучением от восходящего ШАЛ, возникшим за пределами поля зрения оптики детектора, который затем инициировал разряд грозовой молнии, отблеск которого также виден как широкое последующее распределение.

Данная работа докладывалась на

1. 31<sup>st</sup>JEM-EUSOInternationalCollaborationMeeting,
2. 37 Всероссийской конференции по космическим лучам (будет публикация в трудах конференции),
3. 6<sup>th</sup>InternationalConferenceonParticlePhysicsandAstrophysics.

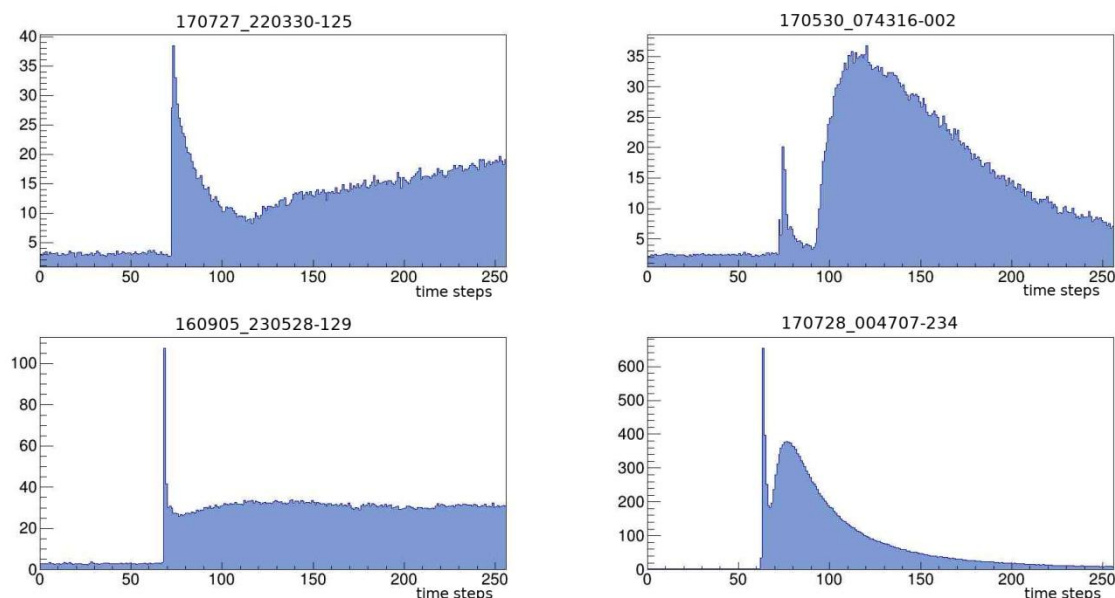


Рис. 1. Примеры «гибридных» аномальных событий.

### Относительная калибровка фотодетектора.

Исходя из предположения о диффузном отражении света внепертурных вспышек молний от солнечных панелей в качестве причины аномальных событий естественно ожидать, что во всех пикселях фотодетектора ТУС измеряется один и тот же отраженный сигнал, который может быть использован для калибровки фотодетектора. Если плотность потока фотонов достаточно велика и пространственно однородна, то различие амплитуд сигналов в пикселях будет обусловлено различием их чувствительности и коэффициентов усиления. В

принципе, такую калибровку можно сделать с помощью каждого из событий. Совпадение калибровок от разных событий стало бы подтверждением внешней природы событий и правомерности самого метода калибровки. Однако это справедливо только в идеальном случае, когда все каналы фотодетектора имеют стабильные во времени характеристики. В действительности это не так из-за изменения физических характеристик каналов фотодетектора во время полета (aging), а также изменения температуры электроники при вхождении в ночную часть орбиты, так как термо-стабилизация фотодетектора не предусматривалась. Такой анализ в настоящее время в работе.

На Рис.2 приведена относительная калибровка пикселей фотодетектора. Сначала было отобрано около 40 событий, в которых нет насыщения сигнала в пикселях фотодетектора, с помощью усреднения которых были измерены относительные калибровочные коэффициенты. Видно, что относительная калибровка фотодетектора по аномальным событиям качественно согласуется по сравнению с ранее выполненной калибровкой с помощью анализа флуктуаций фона коллегами из НИИЯФ МГУ[6]

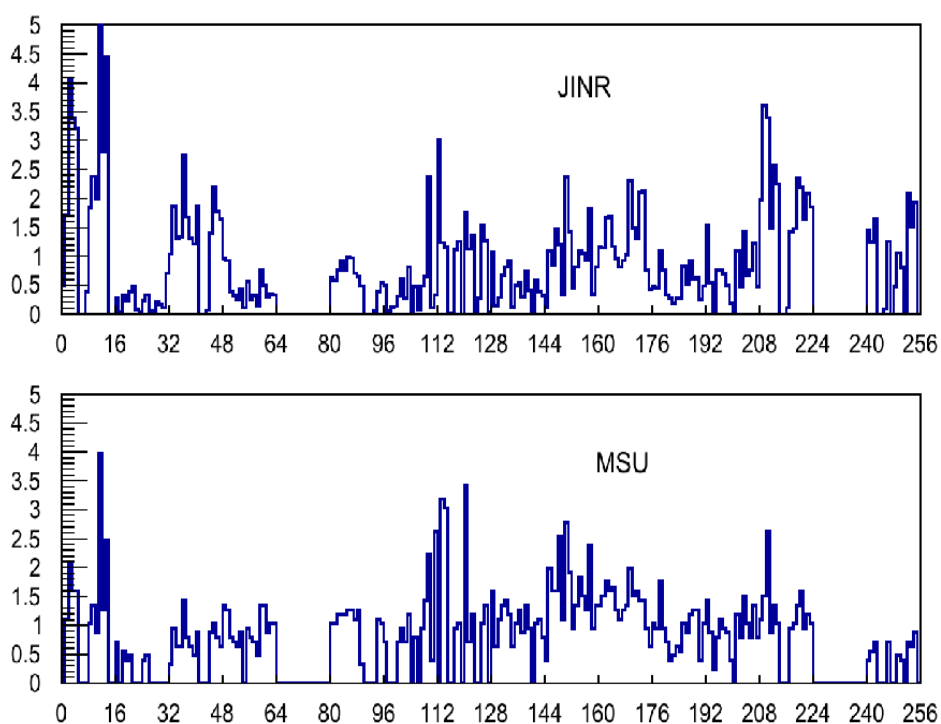


Рис. 2. Измерения калибровки фотодетектора. Вверху — калибровка по аномальным событиям, внизу - по анализу флуктуаций амплитуд в фоновых событиях.

Детектор ТУС в режиме ШАЛ зарегистрировал более 40 событий с аномально большим числом активных пикселей. Вероятной природой таких атмосферных событий являются внеапертурные грозные разряды, диффузное отражение света которых от солнечных панелей спутника попадает на матрицу фотодетектора. Это подтверждается наблюдением комбинированных событий от разряда молнии на площади в апертуре детектора, в которых присутствуют одновременно аномальный диффузно отраженный сигнал на все пиксели фотодетектора, а также сфокусированный зеркалом сигнал от молнии на небольшую локально связанную часть пикселей. Таким образом, показано, что в сигнале каждого пикселя всегда присутствует дополнительный фон, обусловленный диффузным отражением света от источника в атмосфере в солнечных панелях.

Зарегистрировано также несколько «гибридных» событий: узкие шириной в несколько временных тактов пики вначале события, сопровождаемые широкими распределениями, выходящими за пределы временного окна. Возможно, что узкий пик обусловлен Черенковским и флуоресцентным излучением от восходящего ШАЛ, возникшим за пределами поля зрения

оптики детектора, который затем инициировал разряд грозовой молнии, отблеск которого также виден как широкое последующие распределение.

Выполнена относительная калибровка фотодетектора по аномальным событиям, которая качественно согласуется с ранее выполненной калибровкой с помощью анализа флуктуаций фона.

#### **Опубликованные (или уже принятые в печать) работы для активности «ТУС»**

1. М.Лаврова и др. 37-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, Россия (ВККЛ-2022)
2. A.Blinov et al., 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics. Moscow, 29 Nov. 2022 to 2 Dec. 2022

#### **2.2.4. Список основных публикаций авторов ОИЯИ, включая ассоциированный персонал по результатам работы по проекту (список библиографических ссылок).**

В коллаборации опубликовано более 100 работ

1. N. M. Budnev, I. I. Astapov, P. A. Bezyazeev et al., *Nuclear Instrum. and Methods*, A 958, 162113 (2020).
2. L. A. Kuzmichev, I. I. Astapov, P. A. Bezyazeev et al., *Physics of Atomic Nuclei*, 81, 4, 497 (2018)
- 3 L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev et al., *Nucl. Instrum. Meth.* A 952, 161830 (2020)
4. S. Berezhnev et al., (TAIGA Coll.) *Nucl. Instrum. Meth. A*, {bf 692}, 98 (2012)
5. O. Gress, I. Astapov, N. Budnev et al., *Nucl. Instrum. Methods*, A 845, 367 (2017)
6. R. Monkhoev, N. Budnev, A. Gafarov et al., *Bull. of the RAS, Phys.*, 83, 8, 959 (2019).
7. A. Ivanova, N. Budnev, A. Chiavassa et al., *JINST* 15, C06057 (2020)
8. I. Astapov et al (TAIGA Coll.) *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 134, № 4, с. 469-478 DOI (2022)
9. M. Tluczykont, D. Hampf, D. Horns et al., *Astroparticle Physics*, 56, 42 (2014)
10. I. Astapov et al., (TAIGA Coll.) *Bull. of the RAS, Phys*, 81, 4, 460 (2017)
11. L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev et al., *EPJ Web of Conferences*, 145, 01001 (2017)
12. A. D. Panov et al., (TAIGA Coll.) arXiv: 2109.09637
13. N. Budnev et al., (TAIGA Coll.) *JINST* 15, C09031 (2020)
14. A. Grinyuk et al., (TAIGA Coll.) *PoS*, 395 (ICRC2021), 713 (2021)
15. N. Budnev et al., (TAIGA Coll.) *Astroparticle Physics*, 117, 102406, (2020)
16. В. Просинидр (TAIGA Coll.). Доклад на 37 российской конференции космических лучей (Москва, июнь 2022). Будет опубликовано в Изв. РАН, серия физическая .
17. Р. Манхоев и др (TAIGA Coll.). Доклад на 37 российской конференции космических лучей (Москва, июнь 2022). Будет опубликовано в Изв. РАН, серия физическая .
18. W. Apel, J. Arteaga Velázquez, K. Bekk et al., *Astroparticle Physics* 36, 183 (2012)
19. M. G. Aartsen, R. Abbasi, Y. Abdou et al., *Phys. Rev. D*. 88, 042004. (2013)
20. R. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al., *Astrophys. J.*, 858, 76 (2018)
21. A. Yushkov, A. Aab, P. Abreu, et al., *PoS (ICRC2019)* 482; arXiv: 1909.09073 (2019)
22. R. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al., *Astrophys. J.*, 909 2, 178 (2021)
- 23 W. D. Apel et al., *KASCADE-Grande Collaboration Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 171104
24. D. Kang et al (KASCADE-Grande Coll.) arXiv :2208.10229
25. P. Voljegov et al . This conference proceedings
26. Fomin V P, Stepanian A A, Lambet R C et al. 1994 *Astr. Phys.* 2 137

## Опубликованные (или уже принятые в печать) работы за отчетный период

### 1. GAMMA/HADRON SEPARATION FOR A GROUND BASED IACT IN EXPERIMENT TAIGA USING RANDOM FOREST MACHINE LEARNING METHODS

Vasyutina M., Sveshnikova L., Bonvech E.A., Bulan A.V., Chernov D.V., Kalmykov N.N., Korosteleva E.E., Kozhin V.A., Kryukov A.P., Kuzmichev L.A., Lubsandorzhiyev N.B., Mirzoyan R., Osipova E.A., Panov A.D., Podgrudkov D.A., Popova E.G., Postnikov E.B., Prosin V.V., Razumov, Silaev A.A. et al.

В сборнике: Proceedings of Science. 5. Сер. "5th International Workshop on Deep Learning in Computational Physics, DLCP 2021" 2022.

### 2. АСТРОКЛИМАТ РАВНИННЫХ ВЫСОКОГОРНЫХ ЗОН БОЛЬШОГО АЛТАЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ: ПОТЕНЦИАЛ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛНОМАСШТАБНОГО ГАММА-АСТРОНОМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Мордвин Е.Ю., Волков Н.В., Ревякин А.И., Тогоо Р., Астапов И.И., Безъязыков П.А., Бланк М., Бонвеч Е.А., Бородин А.Н., Брюкнер М., Буднев Н.М., Булан А., Вайдянатан А., Вишневский Р., Волчугов П.А., Воронин Д.М., Гармаш А.Ю., Гафаров А.Р., Гребенюк В.М., Гресс О.А. и др.

Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 3. С. 452-456.

### 3. TAIGA—A hybrid array for high energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics

N. Budnev(Irkutsk State U.), I. Astapov(Moscow Phys. Eng. Inst.), P. Bezyazeev(Irkutsk State U.), E. Bonvech(SINP, Moscow), A. Borodin(Dubna, JINR) et al. (Sep 11, 2022)

Published in: Nucl.Instrum.Meth.A 1039 (2022) 167047 • Contribution to: VCI2022

### 4. TAIGA - an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics and high energy gamma-ray astronomy

N. Budnev(Irkutsk State U.), I. Astapov(Moscow Phys. Eng. Inst.), P. Bezyazeev(Irkutsk State U.), E. Bonvech(SINP, Moscow), A. Borodin(Dubna, JINR) et al. (Aug 29, 2022)

Contribution to: ISVHECRI 2022 • e-Print: 2208.13757 [astro-ph.IM]

### 5. Primary Cosmic Rays Energy Spectrum and Mean Mass Composition by the Data of the TAIGA Astrophysical Complex

V. Prosin, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonvech, A. Borodin et al. (Aug 2, 2022)

Contribution to: ISVHECRI 2022 • e-Print: 2208.01689 [astro-ph.HE]

### 6. Optimisation studies of the TAIGA-Muon scintillation detector array

TAIGA Collaboration•I. Astapov(Moscow Phys. Eng. Inst.) et al. (Jun 17, 2022)

Published in: JINST 17 (2022) 06, P06022

### 7. Identification of electromagnetic and hadronic EASs using neural network for TAIGA scintillation detector array

TAIGA Collaboration•I. Astapov(Moscow Phys. Eng. Inst.) et al. (May 16, 2022)

Published in: JINST 17 (2022) 05, P05023

**Руководитель темы**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**Руководитель проекта (шифр проекта) / подпроекта КИП**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**Руководитель проекта (шифр проекта) / подпроекта КИП**  
(в случае нескольких проектов)

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**Экономист лаборатории**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.