

Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П.Н. Лебедева

на правах рукописи

Синицина Вера Юрьевна

**Галактические источники гамма-квантов сверхвысоких
энергий Крабовидная туманность и Тихо Браге
в эксперименте ШАЛОН**

Специальность 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук

Синицина
Вера Георгиевна
(ФИАН, г. Москва)

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук

Блинников
Сергей Иванович
(ГНТЦ РФ ИТЭФ, г. Москва)

доктор физико-математических наук

Рябов
Владимир Алексеевич
(ФИАН, г. Москва)

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына, МГУ, г. Москва

Защита состоится « » июня 2010 года в часов на заседании
диссертационного совета №Д002.023.04 при Физическом институте
им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

А.В. Серов

Общая характеристика работы.

Гамма-астрономия является бурно развивающейся областью современной астрофизики, исследующей космическое гамма-излучение. Одной из основных задач гамма-астрономии сверхвысоких энергий является обнаружение и исследование объектов в Галактике и за её пределами, где ускоряются космические лучи, а также изучение механизмов генерации элементарных частиц в активных астрофизических объектах. Поиски и изучение источников космических лучей по направлениям их прихода сильно осложняется отклонением заряженных частиц в магнитных полях Галактики. Поэтому, для получения информации о распределении космических лучей и межзвёздного газа в Галактике и для определения мест ускорения космических лучей, связанных с астрономическими объектами, могут служить гамма-кванты высоких и сверхвысоких энергий, поскольку они сохраняют направление на источник, не отклоняясь в магнитных полях.

Большим достижением гамма-астрономии в последние годы стала регистрация гамма-квантов от ряда галактических и внегалактических объектов, что даёт богатую информацию для изучения источников космических лучей. Источниками гамма-квантов сверхвысоких энергий могут быть как адроны, так и электроны высокой энергии. Разделение вклада адронной и электронной компоненты в поток гамма-квантов является одной из важнейших проблем современной астрофизики.

Гамма-астрономические исследования ведутся на зеркальном телескопе ШАЛОН Тянь-Шаньской высокогорной станции, созданном в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН и установленном в горах Тянь-Шаня на высоте 3340 м над уровнем моря. С 1992 года и по настоящее время телескоп ШАЛОН используется для наблюдений галактических и метagalactic источников гамма-квантов сверхвысоких энергий. В данной работе описываются как результаты исследований галактических источников, так и экспериментальный подход к решению проблемы генерации космических лучей в галактических источниках – остатках сверхновых [1 – 25].

Актуальность.

В последние два десятилетия наблюдается бурное развитие физики частиц, а также астрофизики и космологии, изучающих процессы, протекающие при энергиях недоступных ускорителям. Так возникла новая область физики – астрофизика элементарных частиц, в которой предпринимаются попытки решить ряд фундаментальных проблем современной физики, используя «природные» ускорители частиц сверхвысоких энергий в активных галактических и метagalactic объектах. Изучение астрофизических источников гамма-квантов и нейтрино сверхвысоких энергий является актуальной задачей физики элементарных частиц. Экспериментальные попытки наблюдения гамма-квантов сверхвысоких энергий по черенковскому излучению в атмосфере

предпринимались более 40 лет тому назад до начала гамма-астрономии на спутниках при меньших энергиях. Основная трудность заключена в низкой интенсивности потока гамма-квантов от обнаруженных источников при энергиях выше 10^{12} эВ. Поток $\leq 10^{-12}$ см⁻² с⁻¹, как это следует из суммарного диффузного потока гамма-квантов такой энергии, можно считать высоким для предполагаемых источников. Это исключает исследования при таких энергиях с помощью телескопической аппаратуры на спутниках и предъявляет высокие требования к наземным, преимущественно высокогорным телескопическим системам, выделяющим электронно-фотонные каскады, от первичных гамма-квантов, среди во много раз превышающего потока широких атмосферных ливней от протонов и ядер космических лучей тех же энергий.

В современной физике и астрофизике всё большее значение приобретают исследования галактических и метagalactic объектов, где реализуются процессы ускорения протонов и ядер, сопровождающиеся генерацией гамма-квантов и нейтрино, которые, будучи нейтральными, не отклоняются в магнитных полях Вселенной. Благодаря этому, изучение гамма-квантов высоких и сверхвысоких энергий помимо информации о распределении космических лучей и межзвёздного газа в галактике могут помочь в отождествлении мест ускорения космических лучей с активными астрономическими объектами.

Результаты недавних наблюдений нескольких остатков сверхновых в рентгеновских и ТэВ-ных гамма-лучах имеют очень большое значение. С самого начала физики космических лучей была широко распространена гипотеза о том, что остатки сверхновых являются уникальными кандидатами в источники происхождения и ускорения космических лучей [26, 27, 28]. Ожидается, что такие наблюдения помогут в решении проблемы происхождения космических лучей, и будут ключевыми для понимания механизма ускорения частиц на распространяющейся ударной волне.

Известно, что многие остатки сверхновых оболочечного типа излучают рентгеновские лучи синхротронного происхождения [26, 27, 28]. Также, несколько таких объектов зарегистрированы в ТэВ-ных гамма-лучах. Нетепловое рентгеновское и гамма-излучение могут генерироваться в остатках сверхновых ионами высоких энергий и электронами от распада нейтральных π^0 -мезонов, рожденных в неупругих столкновениях ионов и теплового газа, или синхротронным, тормозным излучением электронов, или в процессе обратного комптоновского рассеяния. Таким образом, наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах длин волн дают возможность установить ограничения на параметры рассматриваемых процессов ускорения частиц до высоких энергий на ударных волнах остатков сверхновых.

Зеркальные гамма-телескопы ШАЛОН [1 – 7, 25, 29, 32] Физического института им П.Н. Лебедева РАН, на которых получены приведённые в диссертации данные, являются единственными действующими гамма-телескопами Российской Федерации и одной из шести телескопических

установок в мире, ведущих в настоящее время систематические наблюдения локальных источников гамма-квантов в ТэВ-ной области энергий.

Цель диссертационной работы.

Целью работы является выполнение полного цикла экспериментальных исследований и анализа данных по двум галактическим источникам ТэВ-ных гамма-квантов (Крабовидная туманность и остатка сверхновой Тихо), включающего как получение характеристик самих объектов, так и информации об областях происхождения и ускорения космических лучей и механизмах генерации излучения сверхвысоких энергий. Для этого были сформулированы и выполнены следующие задачи:

- Наладка и тестирование электроники регистрирующего 144 канального тракта каждого из телескопов ШАЛОН-1 и ШАЛОН-2; Наладка и калибровка системы автоматического гидирования телескопов ШАЛОН-1 и ШАЛОН-2; Калибровка спектрометрического тракта телескопов ШАЛОН-1 и ШАЛОН-2 по энергии с помощью наблюдаемого вертикального спектра и известного спектра космических лучей;
- Анализ эффективности и проверка критериев отбора ливней, генерированных гамма-квантами, от фона ливней космических лучей;
- Наблюдения галактических источников гамма-квантов Крабовидная туманность и остатка сверхновой Тихо;
- Обработка полученных данных с целью получения основных характеристик изучаемого объекта: спектра гамма-квантов, излучаемых источником, спектрального энергетического распределения, изображений источника и его энергетического изображения (изображения источника по количеству выделившейся энергии);
- Анализ полученных спектров, распределений и изображений с привлечением данных наблюдений при низких энергиях и теоретических моделей для получения информации о механизмах генерации космического излучения и идентификации области ускорения космических лучей с конкретными астрофизическими объектами.

Неотъемлемой частью работы также является исследование и решение возникающих задач, таких как, например, оценка точности получаемых результатов и анализ данных в других диапазонах энергий, для выявления возможной корреляции излучений в различных диапазонах энергетического спектра.

Научная новизна.

Комплекс ШАЛОН АЛАТОО, предназначенный для наблюдений гамма-квантов в интервале энергий 0.8-100 ТэВ от локальных источников, состоит из двух установок, работающих независимо, т. е. телескопов

ШАЛОН-1 и ШАЛОН-2, расположенных на расстоянии 260 м один от другого [1 – 7, 29, 30, 38, 45].

В настоящее время черенковские телескопы ШАЛОН это единственные работающие в широком диапазоне энергий от 0,8 до 100 ТэВ. Каждый из двух телескопов детектирует широкие атмосферные ливни (ШАЛ) от первичного гамма-кванта с энергией 1 ТэВ, при прохождении оси ливня не далее, чем 150 м от одного из телескопов. В этом случае направление прихода первичной частицы, при первичном анализе, определяется с точностью до $0,1^\circ$. Дальнейший, разработанный специально для телескопов ШАЛОН и основанный на методе регуляризации Тихонова [31], анализ улучшает точность определения до величины меньшей $0,01^\circ$. Часть обозреваемого пространства между двумя телескопами ШАЛОН оказывается рабочей областью для обеих установок.

Зеркальная телескопическая система ШАЛОН с площадью составного зеркала $11,2 \text{ м}^2$ и светоприёмником из 144 фотоумножителей имеет наибольшие в мире угловые размеры матрицы фотоумножителей $>8^\circ$. Это позволяет вести контроль фона от заряженных частиц космического излучения и прозрачности атмосферы непрерывно, в процессе наблюдений, а также расширяет площадь наблюдения и, следовательно, эффективность наблюдений [32]. Методика получения информации о фоне космических лучей и ливнях, инициированных гамма-квантами, в одном и том же сеансе наблюдений, является уникальной и применяется в эксперименте ШАЛОН с самого начала его работы. Эта методика служит увеличению полезного времени слежения за источником, при этом, что особенно важно, условия наблюдения источника и фона, такие как толщина и состояние атмосферы остаются одинаковыми. Такой способ недоступен другим гамма-астрономическим экспериментам из-за меньшего поля зрения используемых в мире телескопов.

Кроме того, широкий угол обзора позволяет записывать полностью, без искажений, нецентральные ливни, приходящие на расстояниях более 30 м, количество которых составляет более 90% от всех, регистрируемых телескопом.

Для известного остатка сверхновой Крабовидная туманность получены энергетические спектры, а также детальное изображение центральной части этого источника в диапазоне энергий 0,8 – 30 ТэВ получено впервые телескопом ШАЛОН [8, 10 – 14]. Показана корреляция областей излучения ТэВ-ных гамма-квантов и рентгеновских фотонов (данные телескопа Chandra), из которого определена величина среднего значения величины индукции магнитного поля в части источника видимой в ТэВ-ном диапазоне энергий. Далее показано, что спектр гамма-квантов, генерированных в процессе обратного Комптоновского рассеяния [33] низкоэнергичных фотонов на релятивистских электронах и позитронах, при среднем значении величины силы магнитного поля в области излучения ТэВ-ных гамма-лучей 67нТ находится в согласии с наблюдательными данными телескопа ШАЛОН [19, 21, 23].

Впервые с помощью телескопа ШАЛОН были получены экспериментальные характеристики для остатка сверхновой Тихо (ОСН Тихо, Tycho's SNR), такие как спектр гамма-квантов сверхвысоких энергий от рассматриваемого источника, спектральное энергетическое распределение, изображение источника, и изображение в количестве выделившейся энергии [7 – 14]. Из данных, полученных с помощью телескопа ШАЛОН, в рамках нелинейной кинетической теории [34 – 37], впервые была получена дополнительная информация о параметрах источника, таких как расстояние, плотность межзвёздной среды и магнитное поле. На основании полученного экспериментального материала и при использовании нелинейной кинетической теории [37] для описания свойств Тихо Браге делается вывод об адронном происхождении гамма-квантов сверхвысоких энергий [17, 19, 22, 23, 25]. Таким образом, в Северном Полушарии, в самом деле, возможна регистрация источников гамма-квантов сверхвысоких энергий, причём преимущественно адронного происхождения: поток гамма-квантов от π^0 распада составляет $(2 - 5) \times 10^{-13}$ эрг/(см²сек) и простирается до 100ТэВ, если расстояние до источника лежит в пределах 3,3–4 крс.

Практическая ценность

Полученные данные дают новую информацию для проверки и усовершенствования существующих моделей и теоретических представлений. Решение задач наблюдения и исследования астрофизических объектов при сверхвысоких энергиях с потоками $< 10^{-12}$ см⁻²сек⁻¹ послужило развитию методов регистрации редких событий (слабых излучений), а также, техники и методики обнаружения слабозаимодействующих частиц.

Ряд экспериментальных идей, реализованных в эксперименте ШАЛОН (широкий угол обзора, $>8^\circ$, увеличенная база стереопары и др.) начинают воспроизводиться в новых проектах мира.

Достоверность результатов.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается как сопоставлением данных эксперимента ШАЛОН с результатами, полученными с помощью различных методик в других экспериментах, так и взаимно согласующимся описанием характеристик изучаемого источника во всём широком диапазоне электромагнитного спектра.

Положения, выносимые на защиту.

1. Характеристики регистрирующего тракта телескопов ШАЛОН-1 и ШАЛОН-2, позволяющие работать в широком диапазоне энергий 0,8 – 100 ТэВ.
2. Критерии отбора ливней, инициированных гамма-квантами, от ливней космических лучей в эксперименте ШАЛОН.

3. Методика ведения наблюдений, позволяющая увеличить полезное время наблюдения и сохранять одинаковыми условия наблюдения источника и фона. Наблюдения галактических источников гамма-квантов сверхвысоких энергий Крабовидная туманность и Тихо Браге.
4. Результаты наблюдений галактических источников Крабовидная туманность и остатка сверхновой Тихо: потоки гамма-квантов сверхвысоких энергий, энергетические спектры, изображения источников, энергетические изображения источников, спектральные энергетические распределения.
5. Определение механизмов генерации гамма-квантов сверхвысоких энергий в Крабовидной туманности и остатка сверхновой Тихо.

Личный вклад автора.

Личный вклад автора состоит в монтаже, наладке и калибровке регистрирующих трактов телескопов ШАЛОН-1 и ШАЛОН-2; наблюдениях галактических источников гамма-квантов Крабовидная туманность и остатка сверхновой Тихо; полной обработке полученного материала с построением спектров, спектральных энергетических распределений и изображений; а также в изучении механизмов образования гамма-квантов сверхвысоких энергий в рассматриваемых источниках с использованием нелинейной кинетической теории для ОСН Тихо и обратного Комптоновского рассеяния для Крабовидной туманности и представлении результатов эксперимента на международных и всероссийских конференциях.

Апробация диссертации.

Основные результаты, представленные в работе, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: X International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 1998 (Assergy, Italy); 26 International Cosmic Ray conference, 1999 (Salt Lake City, USA); 27 ICRC, 2001 (Hamburg, Germany); 19 European Cosmic Ray Symposium, 2004 (Florence, Italy); XIII ISVHECRI, 2004 (Pylos, Greece); Towards a Network of Atmospheric Cherenkov Detectors VII, 2005, (Palaiseau, France); 29 ICRC, 2005 (Puna, India); 20 ECRS, 2006 (Lisboa, Portugal); XIV ISVHECRI, 2006 (Weihai, China); 30 ICRC, 2007 (Merida, Mexico); 21 ECRS, 2008 (Kosice, Slovakia); XV ISVHECRI, 2008 (Paris, France); International Workshope "Advances on Cosmic Ray Science", 2008 (Tokyo, Japan); Rencontres de Blois 2008, (Blois, France); 31 ICRC, 2009 (Lodz, Poland); Rencontres de Moriond 2009, (Valle d'Aosta, Italy) и Всероссийских конференциях по космическим лучам, 1999, 2002, 2004, 2006 (Москва), 2008 (Санкт-Петербург).

Научные публикации.

По материалам, представленным в диссертации, опубликовано 25 научных работ в виде статей в журналах *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* [1, 3,

4, 6, 12, 14, 15, 23]; *Известия РАН, Серия. Физическая* [2, 8]; *International Journal of Modern Physics A (IJMPA)* [9]; *Journal of the Physical Society of Japan* [19]; в виде статей в сборниках *Universal Academy Press, Inc.* [5, 7]; в виде статей в сборниках, выпущенных по материалам серии конференций *Toward a Major Atmospheric Cherenkov Detector* [11]; *European Cosmic Ray Symposium* [13, 20 – 22]; *International Cosmic Ray Conference* [10, 17, 18]; *International Cosmic Ray Workshop* [16]; в виде статей в серии сборников *Rencontres de Blois, "Challenges in Particle Astrophysics"* [24]; *Rencontres De Moriond, "Very High Energy Phenomena in the Universe"* [25]; Полный перечень работ автора диссертации составляет 65 печатных изданий.

Структура и объём диссертации.

Работа состоит из оглавления, введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 115 страниц текста и 50 рисунков.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, а также, приведен краткий обзор основных этапов развития и современных достижений в области гамма-астрономии высоких и сверхвысоких энергий.

В первой главе приводится обзор литературы по теме диссертации, а также обзор подходов и методов в изучении астрофизических объектов при высоких и сверхвысоких энергиях. Здесь же дано описание эксперимента ШАЛОН.

Основными целями гамма-астрономии сверхвысоких энергий являются как изучение характеристик самого источника ТэВ-ного гамма-излучения, так и установление связей между конкретными астрофизическими объектами в Галактике и за её пределами с процессами ускорения заряженных частиц космического излучения. Гамма-кванты регистрируются по вторичным электронам и их излучению. В зависимости от области регистрируемых энергий существуют различные способы детектирования гамма-лучей. В диапазоне энергий $10^5 - 10^{11}$ эВ регистрация гамма-квантов проводится за пределами атмосферы (на спутниках или аэростатах). Установки для наблюдения гамма-излучения на спутниках позволяют непосредственно регистрировать гамма-кванты и дают возможность практически полностью избавиться от фона заряженного компонента космического излучения. Регистрация гамма-излучения бóльших энергий требует создания установок с большой эффективной площадью, так как интенсивность гамма-квантов становится малой. В настоящее время нет технических возможностей для выведения таких тяжелых установок в космическое пространство. Вследствие этого гамма-излучение с энергией более 10^{11} эВ возможно регистрировать косвенным методом – с помощью наблюдения широких атмосферных ливней (ШАЛ). При этом площадь регистрации возрастает в $10^4 - 10^5$ раз.

Поскольку интенсивность потока гамма-квантов высоких ($10^9 - 10^{11}$ эВ) и сверхвысоких ($> 10^{11}$ эВ) энергий мала, информацию о первичных гамма-квантах можно получить, регистрируя вторичные частицы, образующиеся при взаимодействии гамма-квантов с атмосферой Земли. Попадая в атмосферу Земли, космическая частица высокой энергии даёт начало каскадному процессу, приводящему к образованию широких атмосферных ливней. Развитие ШАЛ сопровождается черенковским излучением, вызванным электронами и позитронами, движущимися в атмосфере со скоростью большей, чем фазовая скорость света в атмосфере. На уровне наблюдения черенковских фотонов больше, чем заряженных частиц. Поскольку порог генерации черенковского света электронами высок

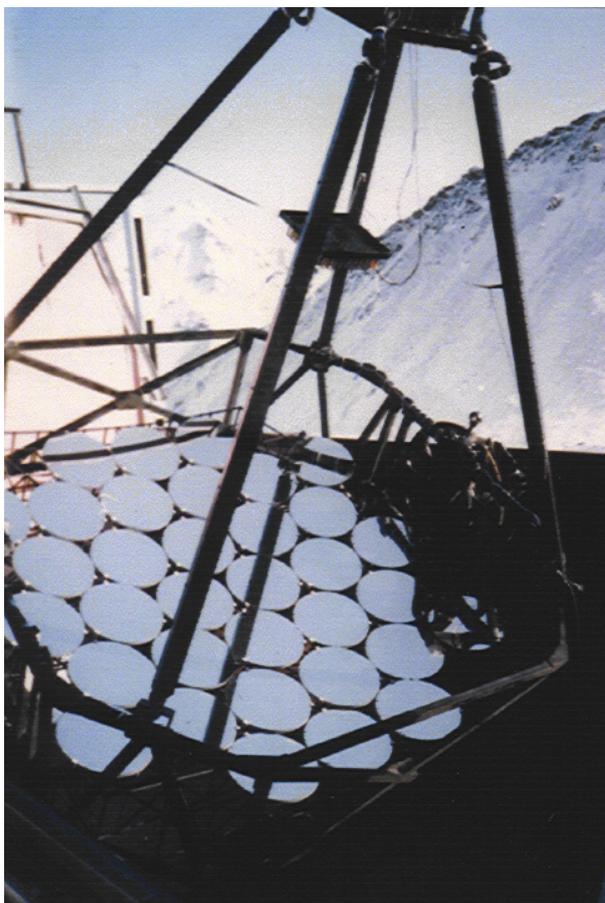


Рис. 1 ШАЛОН-1

Комплекс ШАЛОН АЛАТОО (рис. 1), предназначенный для наблюдений гамма-квантов в интервале энергий 0,8-100 ТэВ от локальных источников, состоит из двух, работающих независимо телескопов ШАЛОН, расположенных на расстоянии 260 м один от другого [1 – 7]. Методические эксперименты и наблюдения на первом зеркальном черенковском телескопе ШАЛОН-1 были начаты более десяти лет тому назад. Основой способов выделения ливней от гамма-квантов на фоне адрон-электронных ливней служит различие каскадных процессов их образования и поглощения в атмосфере. Наиболее устойчивое различие ливней от гамма-квантов и ливней, генерированных протонами, в существенно разном числе электронов

(≥ 21 МэВ), а угол излучения мал ($\sim 1^\circ$), то практически всё распределение черенковских фотонов сосредоточено в радиусе ~ 300 м от оси ливня.

Пробег поглощения фотонов в нижней части атмосферы ~ 18 км, поэтому черенковское излучение без заметных искажений достигает уровня наблюдения и его пространственно-временное распределение содержит информацию о всех этапах развития электронно-фотонного каскада. Широкие атмосферные ливни от протонов и ядер космических лучей становятся по своему составу ливнями мюонов. Поэтому в области сверхвысоких энергий поиски и регистрация ливней от гамма-квантов, а как следствие и их источников, проводятся оптическими зеркальными системами, регистрирующими черенковское излучение ливней - черенковскими телескопами [29, 30, 38, 39, 45].

вблизи уровня наблюдения при одинаковом их числе в максимуме развития ливня. Это приводит к различному распределению света в ячейках матрицы светоприемника. Наше моделирование показало в среднем большее различие характеристик широких атмосферных ливней разной природы при сопоставлении потоков фотонов в малом угле менее 1° вокруг оси каскада с потоком в больших углах $>2^\circ$. При этом амплитудный диапазон каналов регистрации должен составлять более 100, а с учетом необходимости регистрировать хотя бы десятикратный интервал первичных энергий, требования к электронике повышаются до 1000-кратного амплитудного диапазона (см. гл. 2). Как следует из Монте-Карло моделирования ливней от гамма-квантов, флуктуации плотности невелики, но серьезные затруднения связаны с большой зависимостью параметров селекции ливней как от точности направления на источник, так и от расстояния между телескопом и осью ливня. В частности, увеличение углового разрешения системы зеркало-фотоумножитель до величины лучше 0.5° не может привести к уточнению направления на источник без уточнения расстояния между телескопом и осью наблюдаемого ливня. Калибровочные измерения широких атмосферных ливней от протонов и ядер космических лучей позволили откалибровать телескопы ШАЛОН-1 и ШАЛОН-2 и подтвердить их способность эффективно определять угловое распределение черенковского света в ливнях с первичной энергией 1-100 ТэВ.

Во второй главе наряду с детальным описанием систем многоканального зеркального телескопа ШАЛОН (оптической системы, светоприёмника, триггера, регистрирующего тракта), даётся определение и обсуждается выбор критериев отбора гамма-ливней от фоновых ливней от космических лучей.

Оптическая часть телескопа состоит из 38 сферических зеркал диаметром 60 см, закреплённых на сварной вилке, обеспечивающей поворот телескопа по азимуту на 360° . Зенитный угол поворота зеркала заключён в интервале $0^\circ - 110^\circ$. Зеркала образуют единую сферическую поверхность с радиусом кривизны $R=8,5$ м и общей площадью $11,2$ м².

Светоприёмник состоит из 144 фотоумножителей ФЭУ-85, собранных в квадратную матрицу 12×12 и установлен в фокусе зеркала ($F=0.47R$), на расстоянии 4,185 м. Для уменьшения потерь света, вызванных различием диаметров фотокатода и стеклянного баллона фотоумножителя, металлическими конструкциями и квадратной геометрией размещения ФЭУ, на светоприёмнике установлены металлические световоды. Световоды представляют собой полые квадратно-конические насадки из алюминия с отражающей внутренней поверхностью с коэффициентом отражения $\sim 0,85$. Все промежутки между ФЭУ оказываются перекрытыми, т.к. квадратные основания световодов прилегают друг к другу. Использование таких световодов позволяет увеличить светосбор на фотокатоды фотоумножителей в 3 с лишним раза. Каждый ФЭУ просматривает участок небесной сферы,

равный $0,6^\circ \times 0,6^\circ$, так что полный угол обзора телескопа составляет $>8^\circ$, $10 - 15 \text{ mrad}$

Триггер. Система отбора событий сформирована следующим образом. В сумматор включены 4 ФЭУ по одному из каждого квадранта. При появлении хотя бы в одной четвёрке суммарного сигнала выше порогового, вырабатывается триггерный сигнал. В триггерную схему включены центральные 100 фотоумножителей. Суммируются сигналы с последнего динода ФЭУ [38] и время интегрирования сигналов равно 75 нс. Также, при моделировании, было построено распределение черенковских фотонов по времени прихода для одного типичного ливня. Показано, что все фотоны приходят в течение 30 нс, и время «ворот» электроники телескопа 75 нс достаточно для регистрации всех фотонов от одного ливня.

Нижняя граница регистрируемых телескопом энергий оценена из условия, что амплитуда полезного сигнала должна быть хотя бы в три раза больше шумовых сигналов, вызванных свечением ночного неба, интенсивность которого в интервале длин волн $4300 - 5500 \text{ \AA}$ составляет $6,5 \times 10^7 \text{ фот/см}^2\text{с ср}$ [40]. Для варианта из 100 включённых в мастер ФЭУ с объединением по 4 условие отношение сигнал/шум >3 , хорошо выполняется при прохождении ливня вблизи установки, начиная с энергий $\sim 0,8 \text{ ТэВ}$ [41], причём с ростом энергии первичной частицы эффективная площадь регистрации ливней возрастает.

Спектрометрический тракт телескопов ШАЛОН-1 и ЩАЛОН-2 имеет по 144 канала регистрирующей электроники, каждый из которых состоит из:

- Фотоэлектронного умножителя ФЭУ-85;
- Быстрой электроники: сумматора, дискриминатора, линии задержки;
- Восьмиканального широкодиапазонного (12bit) преобразователя заряд-код;
- Аппаратуры САМАС для связи с ЭВМ;
- ЭВМ;

Восьмиканальный широкодиапазонный (12bit) преобразователь заряд-код;

Сигнал с последнего динода ФЭУ по высокочастотным кабелям поступает на регистрирующую электронику, где усиливается, дискриминируется и формируется по длительности и амплитуде. После дискриминатора-формирователя он имеет длительность 30 нсек. Сформированные импульсы во всех ФЭУ поступают на мажоритарную схему совпадений, которая вырабатывает триггерные условия. Импульс схемы совпадений имеет длительность 75нсек и является стробирующим, он же является стартовым импульсом для амплитудного анализа сигналов сработавших ФЭУ, а также импульсом временной привязки для синхронизации одного цикла измерений. На время преобразования амплитуда - код в ЗАЦП ($\sim 200\text{мкс}$) вся установка блокируется. По окончании преобразования происходит считывание амплитудной информации из ЗАЦП в ЭВМ, после чего установка разблокируется и снова готова к регистрации и обработке поступающих событий.

В схеме спектрометрического тракта используется восьмиканальный широкодиапазонный преобразователь «заряд-код» на основе монолитных интегральных микросхем КР1101ПД1 [42]. Модуль содержит восемь идентичных каналов аналого-цифрового преобразования заряда во временной интервал и преобразователей временного интервала в цифровой код; схему управления преобразователями; запускаемый преобразователь импульсов кодирования; интерфейс КАМАК, поддерживающий обмен данными по шине, генерацию L-запросов, декодирование исполнительных команд; стабилизаторы, формирующие напряжения из стандартных напряжений питания крейта КАМАК.

В схеме ЗАЦП отсутствуют переменные резисторы для подстройки входного напряжения стабилизаторов, коэффициентов преобразования и пьедесталов ЗАЦП, представляющие собой источник возможной нестабильности. Подбор элементов для достижения необходимых параметров был произведён при настройке.

Основные параметры преобразователя ЗАЦП следующие:

Разрядность – 11 бит + бит переполнения; Максимальный измеряемый заряд – 1000пКл; Время преобразования – 112 мкс; Диапазон длительностей строка – 50 – 2000нс;

Основной способ отделения ливней гамма-квантов от адрон-электронных ливней основан на различии процессов их образования и поглощения в атмосфере. В соответствии с требованиями, предъявленными к телескопам ШАЛОН, спектрометрический тракт должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) Все каналы регистрации должны иметь одинаковые параметры, такие как динамический диапазон, коэффициент преобразования электронно-регистрирующего тракта и уровень шумов.
- 2) Широкий динамический диапазон, не менее 1000 электронно-регистрирующего тракта, стабильность его параметров во времени, возможность подстройки коэффициента преобразования в широких пределах и уровень собственных шумов меньший, чем шумы фотоумножителей.
- 3) Калибровочная характеристика спектрометрического тракта должна быть линейной.

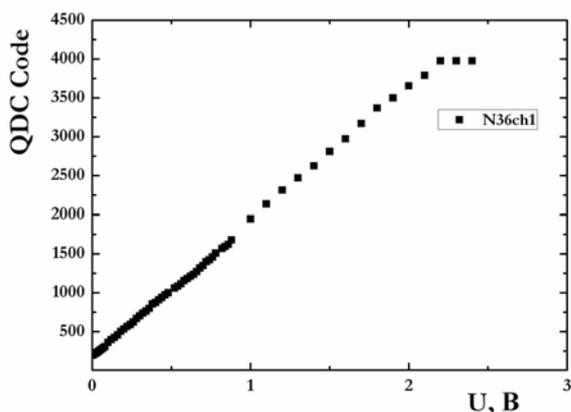


Рис. 2

Типичная калибровочная характеристика канала ЗАЦП; по оси абсцисс отложена амплитуда в вольтах, а по оси ординат - цифровой код амплитуды входного сигнала, подаваемого с генератора на вход канала ЗАЦП

На рисунке 2 приведена калибровочная характеристика одного из модулей, где по оси абсцисс отложена амплитуда в вольтах, а по оси ординат - цифровой код амплитуды входного сигнала, подаваемого с генератора на вход канала ЗАЦП – QDC Code. Калибровка была проведена для полного комплекта блоков ЗАЦП, установленных на телескоп ШАЛОН–2 и для ЗАЦП с телескопа ШАЛОН-1.

Как видно из рисунка, калибровочная характеристика каналов ЗАЦП действительно линейна, погрешность снятия точек определяется приборной погрешностью. Линейная характеристика сохраняется в диапазоне не менее 1000. Минимальный регистрируемый заряд преобразователя равен 0,6 пКл, что при длительности сигнала 30 нс соответствует амплитуде 0,001 В.

Критерии отбора гамма-ливней от фоновых ливней космических лучей.

Черенковское излучение от ШАЛ попадает на зеркала и, отражаясь от них, вызывает засветку определённой части фотоумножителей в матрице светоприёмника. Ясно, что большему числу фотонов, попадающих на фотокатод ФЭУ, соответствует большее число выбитых из него фотоэлектронов.

Изображение черенковского света от ливня в плоскости светоприёмника представляет собой в общем случае эллиптическое световое пятно с максимумом в центральной части. С точки зрения отбора полезных событий, т.е. событий от первичных гамма-квантов, для нас представляет интерес изучение углового и пространственного распределения черенковского излучения ливней.

Обработка светового образа происходит следующим образом:

1. Находятся координаты центра тяжести пятна $\langle X \rangle$, $\langle Y \rangle$

$$\langle X \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad \langle Y \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

где X_i , Y_i – координаты (в градусах) центра i – ой ячейки, S_i – плотность фотоэлектронов в этой же ячейке.

2. Определяется расстояние *Distance* от центра тяжести пятна до центра поля зрения детектора (источник обычно находится в центральной части поля зрения телескопа):

$$Distance^2 = \langle X \rangle^2 + \langle Y \rangle^2$$

3. Определяются вторые моменты образа:

$$\langle X^2 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times X_i^2}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad \langle Y^2 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times Y_i^2}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad \langle XY \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times X_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

4. Световой образ приближается двумерным нормальным распределением с центром в точке ($\langle X \rangle$, $\langle Y \rangle$):

$$P(X, Y) = \frac{1}{2\pi\sigma_X\sigma_Y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(X - \langle X \rangle)^2}{\sigma_X^2} + \frac{(Y - \langle Y \rangle)^2}{\sigma_Y^2} \right] \right\} \text{ где}$$

$$\sigma_X = \sqrt{D_X}, \sigma_Y = \sqrt{D_Y},$$

$$D_Y = \langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2, D_X = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2, D_{XY} = \langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle$$

Тогда величины большой и малой полуосей пятна *Length* и *Width* будут определяться как

$$\langle Length \rangle = \sqrt{\frac{D_X + D_Y + [(D_Y - D_X)^2 + 4(D_{XY})^2]^{1/2}}{2}},$$

$$\langle Width \rangle = \sqrt{\frac{D_X + D_Y - [(D_Y - D_X)^2 + 4(D_{XY})^2]^{1/2}}{2}}$$

5. Вычисляется азимутальная ширина пятна *Azwidth*

$$\langle Azwidth \rangle = \left\{ \frac{\langle X \rangle^2 \langle Y \rangle^2 - 2\langle X \rangle \langle Y \rangle \langle XY \rangle + \langle X \rangle^2 \langle Y \rangle^2}{Distance^2} \right\}^{1/2}$$

6. Вычисляется параметр *Miss*, равный расстоянию от центра матрицы до прямой, лежащей на большой полуоси пятна:

$$\langle Miss \rangle^2 = \frac{1}{2} \left\{ \left[1 + \frac{D_X - D_Y}{[(D_Y - D_X)^2 + 4D_{XY}^2]^{1/2}} \right] \langle X \rangle^2 + \left[1 + \frac{D_X - D_Y}{[(D_Y - D_X)^2 + 4D_{XY}^2]^{1/2}} \right] \langle Y \rangle^2 \right\} - \frac{2D_{XY} \langle X \rangle \langle Y \rangle}{[(D_Y - D_X)^2 + 4D_{XY}^2]^{1/2}};$$

7. Далее определяется параметр *Alpha*, представляющий собой угол между прямой, лежащей на большой полуоси и прямой, которая проходит через центр тяжести пятна и центр матрицы светоприёмника:

$$Alpha = \arcsin(Miss/Distance);$$

8. Наконец, оказалось целесообразным помимо описанных критериев, называемых параметрами Хилласа [43, 44], построить ещё одну характеристику светового пятна. Этот параметр был специально разработан для гамма-телескопа ШАЛОН, имеющего угловое разрешение ячейки матрицы 0.6° . В матрице со световым образом выбирается ячейка с максимальной интенсивностью (плотностью фотоэлектронов) *Intmax*. Затем берутся восемь, окружающих максимальную, ячеек и в них суммируется интенсивности фотоэлектронов. Сумма обозначается как *Inteig*. Сумма интенсивностей фотоэлектронов в оставшихся ячейках (кроме девяти вышеназванных) обозначается *Intsur* и строятся отношения:

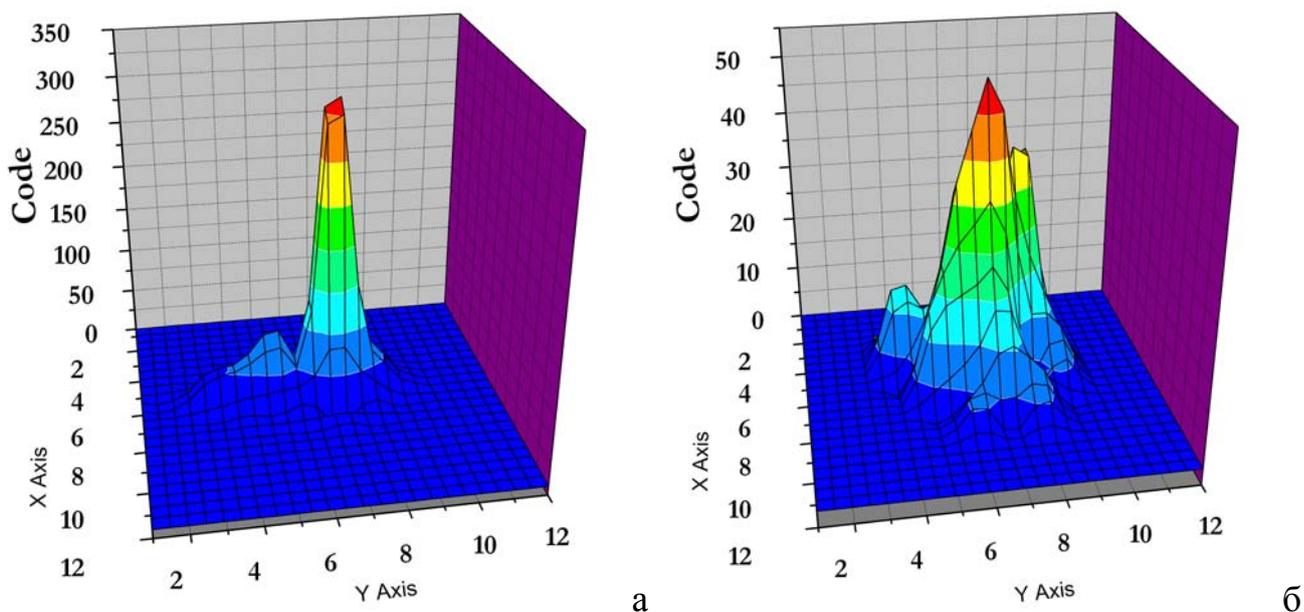


Рис. 3 а – Гамма- ливень с энергией 5ТэВ; б – протонный ливень с энергией 5 ТэВ. Изображение в матрице светоприёмника, по осям абсцисс и ординат отложены номера ФЭУ, по оси аппликат отложена интенсивность в кодах ЗАЦП.

$$Int0 = Intmax/Inteig, Int1 = Intmax/Intsur [39, 45].$$

Было показано, что эти отношения очень чувствительны к типу первичной частицы. Это основано на том факте, что при одинаковой начальной энергии ширина гамма-ливня в атмосфере всегда меньше чем протонного ливня (рис. 3) [39, 45].

Построенная зависимость параметра *Distance* от расстояния оси ливня до телескопа для гамма-ливня с энергией 1 ТэВ хорошо передаёт существующую корреляцию между этим параметром и расстоянием до оси телескопа. Это значит, что ливень, приходящий на определённом расстоянии от телескопа, даёт световой образ в матрице, центр тяжести которого лежит в строго определённом интервале расстояний до центра матрицы. Такой корреляции не существует для протонных ливней, поскольку направления их приходов хаотичны и соответственно центр тяжести образа может лежать на матрице где угодно.

Для гамма-ливней с начальной энергией 1ТэВ построено распределение количества ливней, прошедших через триггерную систему телескопа, в зависимости от расстояния от телескопа до оси ливня. Распределение показало, что часть ливней от гамма-квантов с энергиями, близкими к пороговой энергии установки и лежащих на расстояниях, больших 150 м, не проходят через триггерную систему телескопа, т.е. не регистрируются им. В результате было получено, что интересующие нас ливни от гамма-квантов дают световой образ в матрице, имеющей центр тяжести не дальше, чем 3.5 элементарных ячейки, (см. рис. 4, распределения гамма-ливней по параметру *Distance*).

Аналогичное распределение построено и для первичных протонов. Обрезание ливней триггером установки происходит на расстояниях оси от телескопа ~80м, что объясняется меньшим количеством черенковского света, излучаемого протонным ливнем, чем гамма-ливнем той же энергии [39, 45].

Анализ распределений ливней по параметрам *Length* и *Width* показал, что средние значения параметров *Length* и *Width* для гамма- и протонных-ливней в принципе одинаковы и, следовательно, они не могут служить в качестве критерия отбора. Но оказалось интересным рассмотреть отношение *Length/Width*, распределение которого для гамма- и протонных ливней представлены на рис. 4. а. Это отношение для гамма-ливней лежит в промежутке (ширина на полувысоте) 1,6 – 2,4, для протонных-ливней – в промежутке 1,1 – 2,0. Это значит, что, взяв критерием, параметр $Length/Width > 1,6$, тем самым мы исключаем ~49% протонных ливней, оставляя нетронутым количество гамма-ливней. В пользу этого выбора свидетельствует ещё и тот факт, что *Length/Width* устойчиво относительно изменения энергии первичной частицы. Это весьма важно, поскольку в реальном эксперименте невозможно заранее узнать, какова была энергия у первичной частицы, световой образ которой мы зарегистрировали.

Для параметра *Azwidth*, стандартно использующегося в гамма-астрономии и являющегося параметром Хилласа, получаем следующие промежутки, в которых лежит его значение: гамма-ливни – 0,3 – 0,8 элементарных ячейки, протонные ливни – 0,4 – 1,3 элементарных ячейки. Отрезок [0,3; 0,8] подходит для наших целей, однако зависимость *Azwidth* от энергии первичной частицы делает его непригодным для выбора в качестве критерия.

Что касается параметров *Miss* и *Alpha*, то они взаимосвязаны и поэтому одного из них достаточно для анализа. *Alpha* представляет собой угол между большой полуосью светового образа и направлением на источник. Ясно, что поскольку для протонов все направления прихода равновероятны, то *Alpha* для них лежат в промежутке 0° – 90°. Изображения гамма-ливней на матрице ФЭУ имеют ярко выраженное направление на источник (центр матрицы) и угол *Alpha* лежит для них в промежутке 0° – 20° (рис. 4). Таким образом, применение критерия $Alpha < 20^\circ$ помогает отбросить около 72% имеющихся в распоряжении фоновых протонных событий.

Следующими независимыми от энергии первичной частицы параметрами являются *Int0* и *Int1* (рис. 4). Исходя из распределений этих величин, получены интервалы, в которых они лежат для гамма- и протонных ливней: $Int0(\text{gamma}) > 0,2$, но $Int0(p) < 0,6$, таким образом для эффективного отбора гамма-ливней от протонных берём $Int0 > 0,6$. Соответственно параметр *Int1* имеет следующие интервалы: $Int1(\text{gamma}) > 0,8$ и $Int1(p) < 0,8$ и, следовательно, $Int1 > 0,8$. Оказалось, что параметры *Int0* и особенно *Int1* очень чувствительны к типу первичной частицы и очень полезны в качестве критерия отбора при анализе экспериментальных данных.

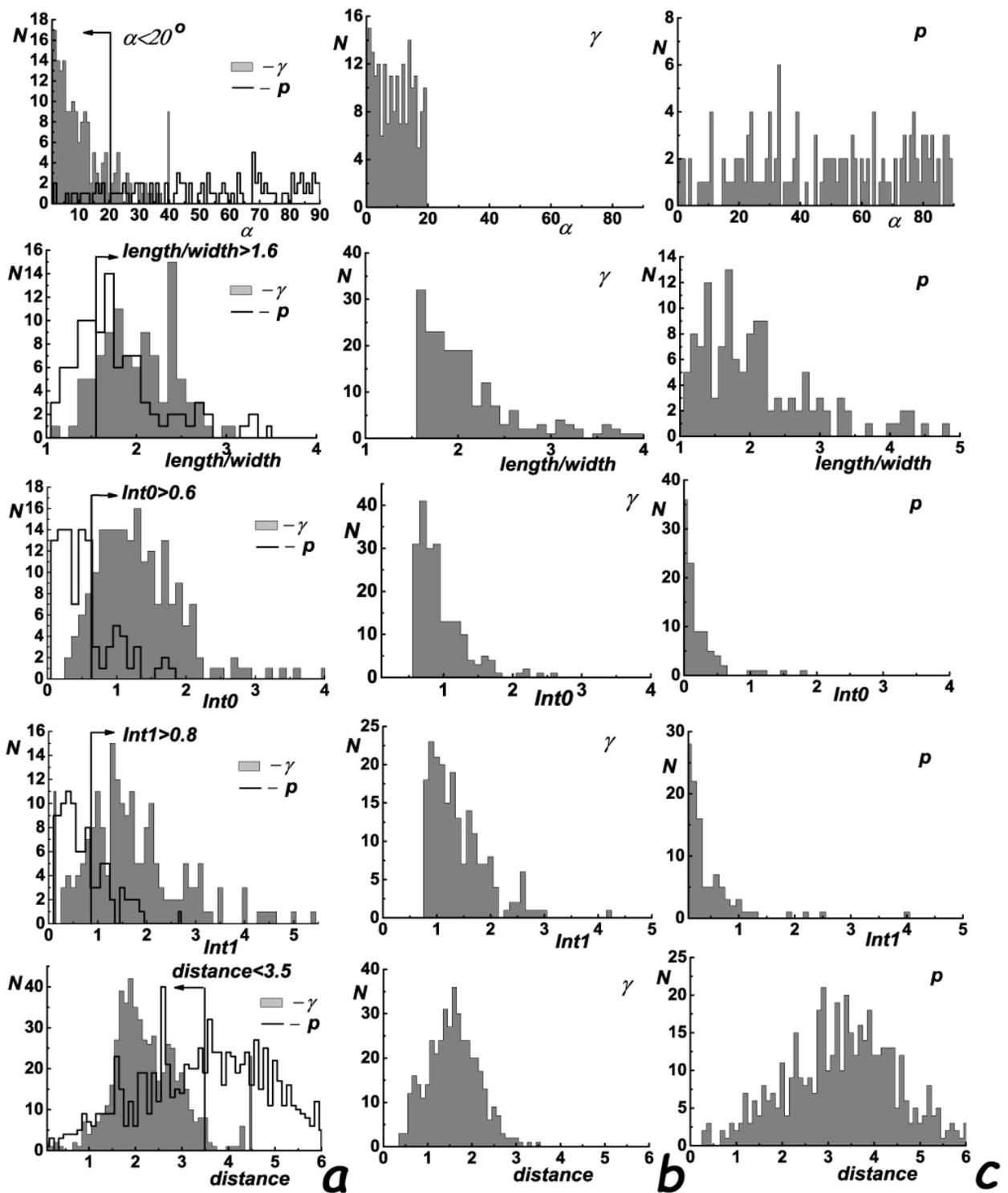


Рис.4 а – Распределения имидж параметров для гамма-квантов и протонов: а – расчеты методом Монте-Карло для эксперимента ШАЛОН. б - экспериментальные распределения имидж параметров для гамма-квантов от точечных источников; с – в для протонов космических лучей, полученных в наблюдениях на телескопе ШАЛОН-1.

При применении параметров $Int0$ и $Int1$, отсеется, соответственно 92% и 88% протонных ливней (с учётом флуктуации средних значений самих параметров).

В результате описанного выше анализа, получены значения параметров, при помощи которых можно отобрать гамма-ливни из всего набора имеющихся в распоряжении экспериментальных световых образов (см. рис. 4). С 1994 года из всех, более чем $2,6 \cdot 10^6$ ливней, зарегистрированных в эксперименте ливней, было отобрано по различным источникам более 3500 ливней от гамма-квантов.

На рисунке 4 приведены распределения пяти критериев отбора ALPHA, LENGHT/WIDHT, INTO, INT1 и DISTANCE для гамма-квантов в интервале энергий 1-10 ТэВ. Для проверки распределений полученных с помощью программ моделирования были построены соответствующие распределения для протонов, а для проверки расчётов - распределения гамма-квантов и протонов по пяти параметрам, используемым в эксперименте. Анализ распределений показал, что вклад фоновых – протонных событий в гамма-события составляет не более 10%, т. е. отсекается 99,92% фона, тогда как потеря гамма-квантов, по проведённым оценкам не превышает 35%, что учитывается в последующем анализе [2 – 6, 8, 18, 20, 24].

В третьей главе описан порядок наблюдения источников на зеркальных черенковских телескопах ШАЛОН и последующая обработка данных, полученных в наблюдениях. Пакет программ телескопов ШАЛОН позволяет вести слежение за источником, проводить регистрацию событий и контроль электроники в автоматическом режиме.

Процедура наблюдения предполагаемого источника состоит из: выбора объекта исследования из каталога телескопа ШАЛОН - источник должен длительное время, не менее часа, находиться в поле зрения установки (его зенитное расстояние не должно превышать 35°); автоматического наведения телескопа на источник; автоматической проверки электроники и регистрации ливней. Движение телескопа за выбранным источником осуществляется с интервалом 6 минут.

Сеанс наблюдений одного источника состоит из, не менее чем, 10 шестиминутных сеансов, в течение каждого из которых источник проходит по центральной части матрицы. В начале сеанса наблюдений снимаются калибровочные характеристики ЗАЦП, а перед каждым шестиминутным сеансом производится считывание значений на выходе спектрометрического тракта при отсутствии сигналов на входе, называемых пьедесталами; эта процедура необходима для контроля стабильности работы электроники. Контроль точности ведения телескопа за объектом осуществляется по изображению опорной (гидировочной) звезды на матрице светоприёмника видимого в темновых токах ФЭУ. Изображение звезды на матрице светоприёмника получается при считывании темновых токов всех ФЭУ, производящимся в процессе наблюдения 1 раз в минуту. Таким образом, известна траектория звезды в поле зрения телескопа, в одном, шестиминутном, сеансе наблюдений. В результате чего, положение источника на матрице, измеренное по темновым токам, известно с точность $\sim 0,06 - 0,08^\circ$. Также, с помощью построения траектории движения опорной

звезды, выполняется калибровка координат телескопа, с тем отличием, что траектория восстанавливается по большему числу точек, что повышает точность определения координат оси телескопа до величины меньшей $0,01^\circ$.

Для дополнительного удобства и расширения каталога опорных звёзд (сейчас используются звёзды со звёздной величиной не меньше 5) на телескопе ШАЛОН используется чувствительная CCD-камера (320 kpixels) – гид. Это вспомогательный, оптический телескоп с меньшим, $6^\circ \times 6^\circ$, чем у основного телескопа, полем зрения, закреплённый параллельно оптической оси черенковского телескопа и служащий для наведения на объект и последующего гидирования телескопа за объектом. Движение телескопа осуществляется автоматически на основе решения программой уравнений движения объекта по небесной сфере; контроль передвижения осуществляется датчиками угла поворота.

Регистрация ливней в наблюдениях производится в автоматическом режиме считыванием значений на выходе всех ЗАЦП по срабатыванию схемы совпадений. Информация о зарегистрированных ливнях состоит из: пьедесталов, номера события в текущем сеансе, времени прихода события, «изображений» ливней, записанных в кодах ЗАЦП, также записывается траектория опорной звезды в темновых токах ФЭУ и горизонтальные координаты телескопа в данном сеансе.

В четвёртой главе представлены результаты наблюдений галактических источников Крабовидная туманность и остатка сверхновой Тихо с анализом механизмов образования гамма-квантов сверхвысоких энергий в рассматриваемых источниках.

Непосредственные данные о распределении космических лучей в остатках сверхновых могут быть получены из наблюдений гамма-квантов сверхвысоких энергий. Присутствие электронной компоненты космических лучей хорошо видно по излучению, генерируемому ею в остатке сверхновой в широком диапазоне длин волн от радио до гамма-излучения средних энергий, тогда как ядерная компонента космических лучей может быть обнаружена только по гамма-излучению сверхвысоких энергий. Если наличие ядерной компоненты в остатке сверхновой существенно, то в результате неупругих столкновений ядер, приводящих к образованию пионов с их последующим распадом, рождаются гамма-кванты сверхвысоких энергий на достаточном для детектирования уровне [36]. Спектры гамма-квантов, рождаемых адронной и электронной компонентами космических лучей, имеют подобную форму при энергиях от 1 ГэВ до 1 ТэВ из-за синхротронных потерь электронов [35]. Таким образом, единственная экспериментальная возможность различить адронный и лептонный вклады – это измерить спектр гамма-квантов при энергиях выше 1 ТэВ, где предполагается существенное различие.

Как предполагается [33, 46, 47], особенно при сверхвысоких энергиях, превышающих 1 ГэВ, гамма-кванты, рождённые в процессе обратного комптоновского рассеяния, являются доминирующим излучением в

плерионах типа Крабовидная туманность, где ветер релятивистских электронно-позитронных пар, исходящих от пульсара, рассеивается в окружающей ударной волне глубоко внутри оболочки сверхновой.

Согласно теоретическим предсказаниям около 20 остатков сверхновых должны быть видимы в ТэВ-ных гамма-лучах в Северном полушарии. Результаты по одному из них, остатку сверхновой Тихо, зарегистрированному впервые телескопом ШАЛОН, представлены в данной работе. Ещё один источник типа плерион, регулярно и всесторонне исследуемый большим количеством независимых групп с использованием различных методов регистрации ливней инициированных гамма-квантами – Крабовидная туманность.

Крабовидная туманность.

В истории современной астрофизики Крабовидная туманность сыграла важную роль. Ни один другой космический объект не стимулировал развитие идей и методов современной экспериментальной и теоретической астрофизики так, как эта туманность. В Крабовидной туманности находится пульсар, у которого впервые было обнаружено оптическое, рентгеновское и гамма-излучение. Как и в других диапазонах электромагнитного спектра, Крабовидная туманность является эталонным источником для ТэВ-ной гамма-астрономии. Возможно, наиболее важным является тот факт, что этот источник со стабильным потоком может использоваться для калибровки черенковских телескопов, расположенных как в Северном, так и в Южном полушарии. Развитие методов гамма-астрономии, опробованных в наблюдениях Крабовидной туманности, привело к обнаружению Активных Галактических Ядер и остатков сверхновых в нашей Галактике.

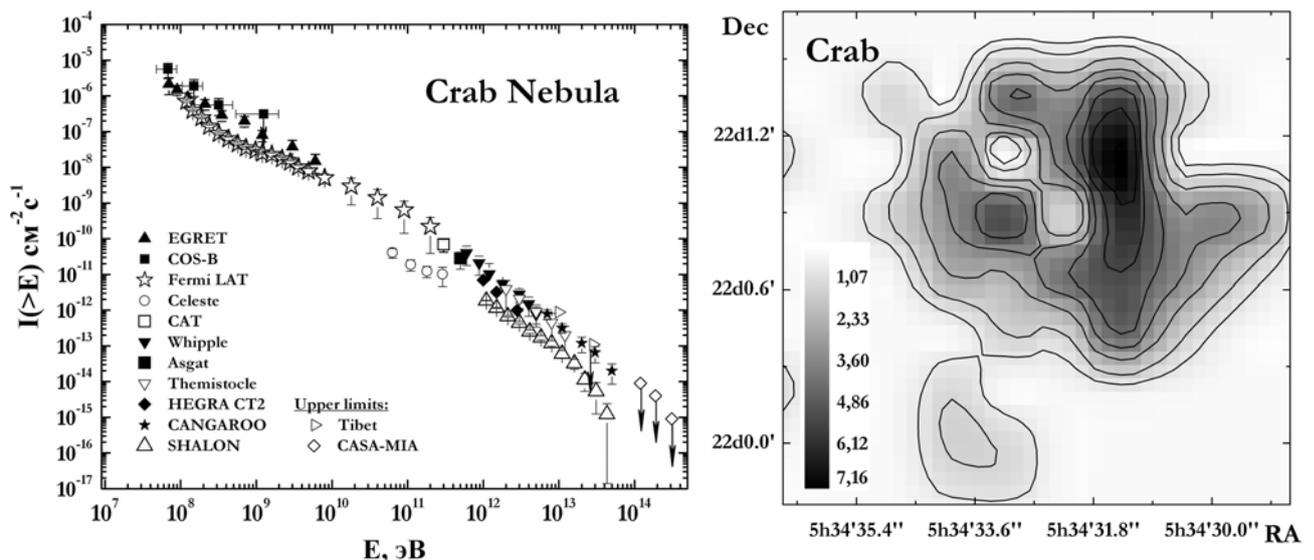


Рис. 5 слева: Интегральный спектр гамма-квантов ($E > 0,8 \text{ ТэВ}$) от Крабовидной туманности по данным ШАЛОН в сравнении с данными других экспериментов; справа: Изображение источника Крабовидная туманность в области энергий $> 0,8 \text{ ТэВ}$.

Результаты наблюдения Крабовидной туманности с помощью телескопа ШАЛОН представлены на рисунке 5 (слева) в сравнении с данными, полученными в других экспериментах. Крабовидная туманность была зарегистрирована телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне 35σ по Li&Ma [48]. Энергетический спектр в диапазоне энергий от 0.8 до 20 ТэВ хорошо описывается единым степенным законом $I(>E_\gamma) \propto E_\gamma^{-1.40 \pm 0.07}$ (см. рис. 5 слева). Также представлено изображение источника в ТэВ-ом диапазоне энергий, полученное с помощью телескопа ШАЛОН (рис. 5. справа, рис. 6 слева).

Крабовидная туманность в широком диапазоне энергий имеет спектр характерный для синхротронного излучения электронов с энергиями от ТэВ до ПэВ. Этот непрерывный спектр обрывается около 10^8 эВ и фотоны, рождённые релятивистскими электронами и позитронами (10^{15} эВ) путём обратного комптоновского рассеяния, формируют новую компоненту спектра в ГэВ – ТэВ-ом диапазоне энергий (см. рис. 6 справа).

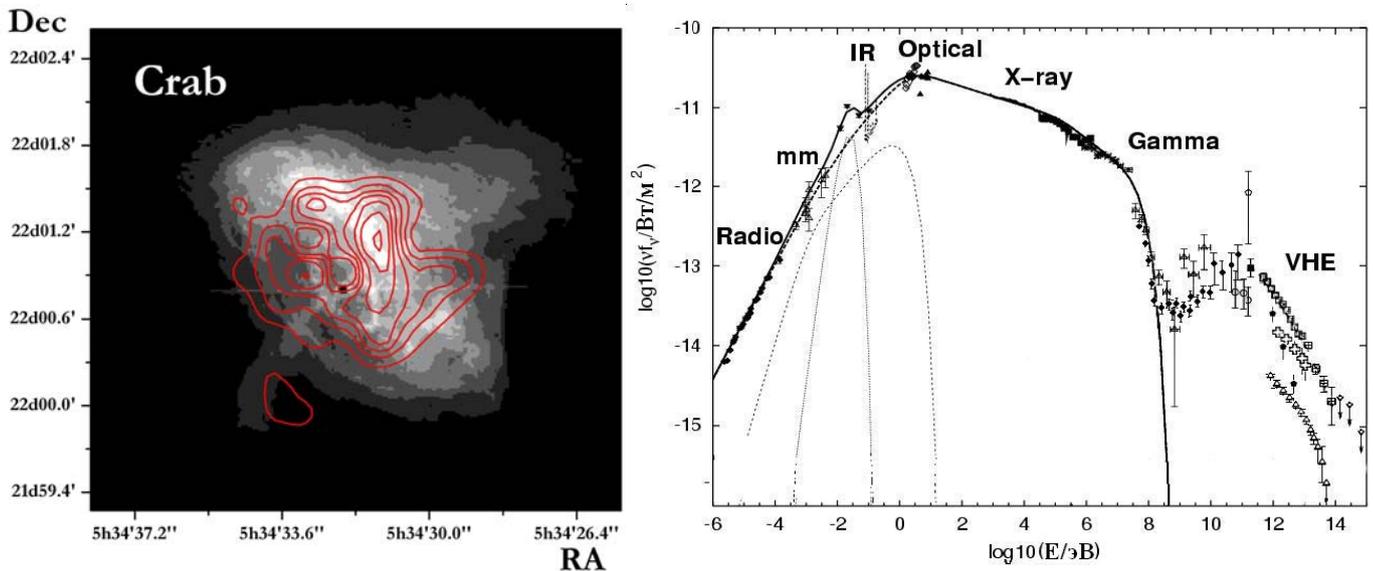


Рис. 6 слева: Изображение центральной части Крабовидной туманности в рентгеновском диапазоне, полученное телескопом Chandra. Контуром представлены данные телескопа ШАЛОН в области энергий 0,8 – 30 ТэВ; справа: Спектральное энергетическое распределение Крабовидной туманности в широком диапазоне электромагнитного спектра.

Для описания спектра гамма-квантов с энергией $>0,8$ ТэВ была использована модель обратного комптоновского рассеяния, описанная в литературе [26, 33, 46, 47]. Чтобы получить спектр гамма-квантов, генерированный в процессе обратного комптоновского рассеяния, необходимо определить спектр релятивистских электронов из известного спектра низкоэнергичных фотонов [33], для чего используется спектр Крабовидной туманности от радио- до гамма-лучей.

Таблица 1. Величина магнитной индукции в разных областях Крабовидной туманности по данным телескопа Chandra [49]

Область	Магнитная индукция, (10^{-4} Гаусс)	Время торможения электронов (годы)	Размер области (световые годы)
Среднее по PWN	5,8	6,7	1,9 (60'' радиус)
Яркий тор	7,7	4,3	1,7 (радиус)
NW петля	9,1	2,9	0,6
Центр джета, область 7	9,1	2,9	1,8 (длина джета)
Яркое внутреннее кольцо	10,8	2,6	0,08 (толщина кольца)
Пятна на ярком внутреннем кольце	15,3	1,5	0,07 (размер пятно)
S выброс, область 5	6,2	5,9	1,3 (длина выброса)
SW выброс, область 7	6,2	5,9	1,3 (длина выброса)

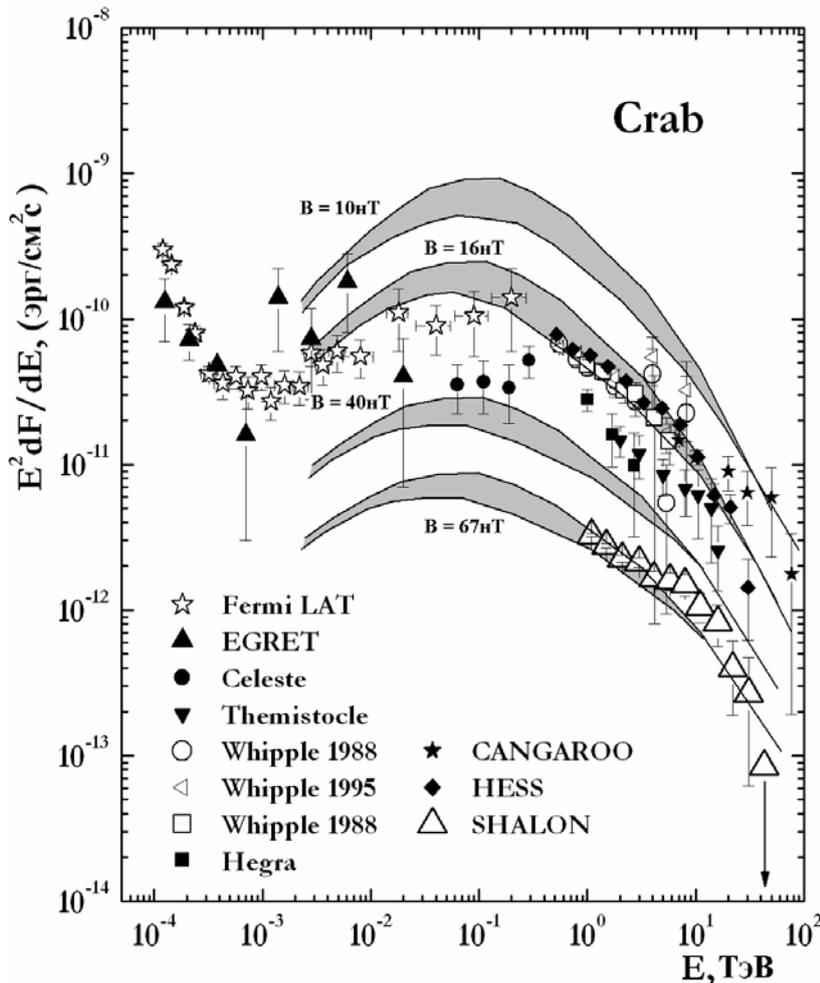


Рис. 7

Спектр Крабовидной туманности по данным ШАЛОН в сравнении с данными других экспериментов. Линиями показаны расчеты спектров ТэВ-ных гамма-квантов рождённых в процессе обратного комптоновского рассеяния релятивистских электронов на низкоэнергичных фотонах в предположении различных значений магнитного поля в источнике: 10нТ, 16нТ, 40.нТ [33], 67нТ – эксперимент ШАЛОН.

Дополнительно необходимо найти величину магнитной индукции в области излучения ТэВ-ых гамма-квантов; расстояние до туманности принято равным 2 кпк. Для получения необходимых в вычислениях характеристик и нахождения взаимосвязи между областями излучения ТэВ-ных гамма-лучей и рентгена, были скомбинированы изображения полученные телескопом ШАЛОН (0,8 – 30ТэВ) и телескопом Chandra (рентген). На рисунке 6 (слева) представлено изображение центральной части Крабовидной туманности – 200''×200'' в рентгеновском диапазоне энергий 0,2 – 20 кэВ, полученное телескопом Chandra. В этой области энергий основной вклад в поток даёт тор, окружающий пульсар. Контурами представлена структура Крабовидной туманности, видимая в ТэВ-ных гамма-лучах телескопом ШАЛОН в области энергий 0,8 – 30 ТэВ. Здесь основной вклад в поток частиц тоже вносит область тора, тогда как основной вклад в поток энергии вносит как область тора, так и области яркого внутреннего кольца и южного джета. Величины магнитных полей в основных областях представлены в таблице 1 [49].

Спектр гамма-квантов с энергиями выше 1 ТэВ, генерированный фотонами синхротронного излучения электронов и позитронов путём обратного комптоновского рассеяния, с учётом найденного из сопоставления областей излучения в рентгеновской и ТэВ-ой областях энергий, силы магнитного поля, представлен на рисунке 7. Наблюдаемый телескопом ШАЛОН-1 спектр гамма-квантов хорошо согласуется с рассчитанным спектром гамма-квантов, генерированным в процессе обратного комптоновского рассеяния низкоэнергичных фотонов на релятивистских электронах в изображаемых областях туманности, если взять среднее значение величины магнитного поля равным 67нТ (нижняя кривая).

Остаток сверхновой Тихо.

Как уже отмечалось, информация о распределении космических лучей в остатках сверхновых может быть получена из гамма-астрономических наблюдений, поскольку, гамма-кванты сверхвысоких энергий генерируются

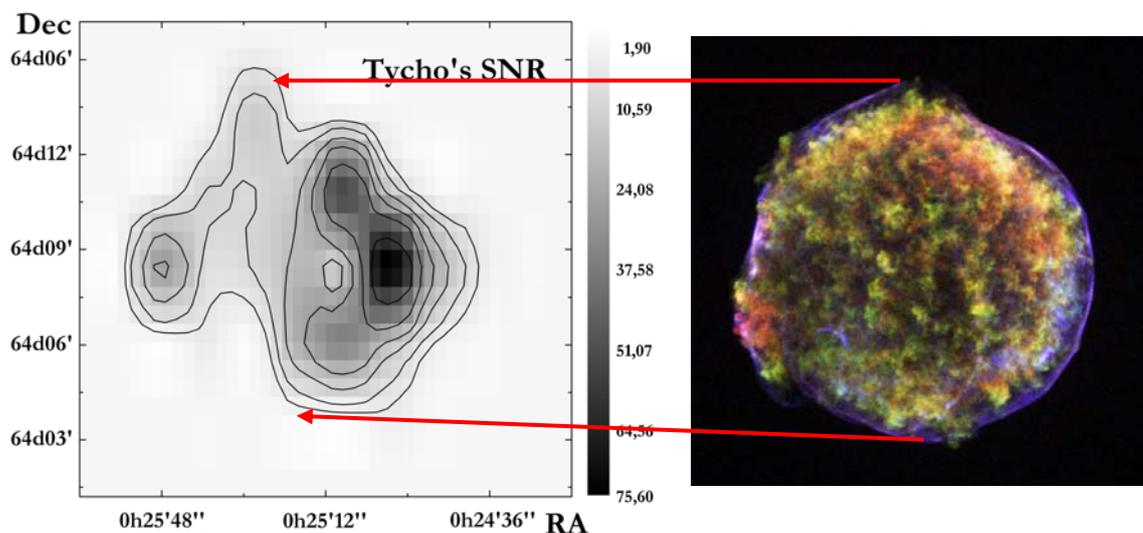


Рис. 8 Слева: Изображение остатка сверхновой Тихо по данным телескопа ШАЛОН, Справа: Изображение ОСН Тихо в рентгене полученное с помощью обсерватории Chandra.

электронной и адронной компонентами космических лучей в обратном комптоновском рассеянии и в столкновении адронов, приводящих к рождению π^0 -мезонов с последующим их распадом.

Остаток сверхновой Tycho's SNR (SN 1572) привлекателен для исследований и теоретических предсказаний благодаря высококачественным изображениям и спектрам, полученным с помощью обсерваторий XMM-Newton и Chandra. Он имеет почти сферическую форму, что удобно для моделирования. Возраст Tycho's SNR хорошо известен и составляет 435 лет. Но радиус этого остатка сверхновой известен не так точно. Значение радиуса зависит от принятого расстояния, которое определяют разными методами, откуда величина радиуса получается примерно 2-3 пк. Также, не известны точные значения и характеристики межзвездной среды вокруг остатка.

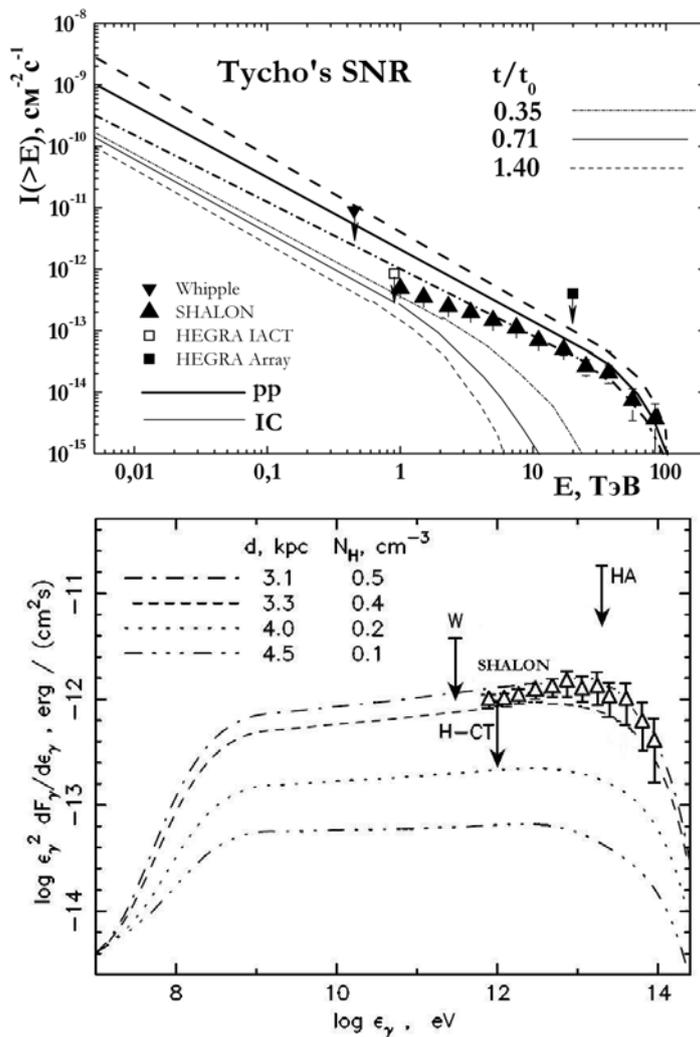


Рис. 9 Вверху: Интегральный спектр γ -квантов от ОСН Тихо по данным телескопа ШАЛОН в сравнении с данными других экспериментов: Whipple, HEGRA IACT- system, HEGRA AIROBICC и теоретические расчёты [34]: Внизу: Спектральное энергетическое распределение гамма-излучения от Tycho's SNR [37], здесь Δ - данные телескопа ШАЛОН.

Сравнение результатов моделирования остатка сверхновой с наблюдениями Tycho's SNR позволяет прояснить значения неизвестных параметров и судить о механизме взрыва сверхновой. ОСН Тихо был зарегистрирован телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне 17σ по Li&Ma [48]. Среднее значение потока при энергиях больше 0,8 ТэВ для Тихо Браге, слабого в рентгеновском диапазоне и наблюдаемого в области радио - излучения, составляет:

$$I_{Tycho} = (5,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

Приведен интегральный спектр Tycho's SNR. Энергетический спектр остатка сверхновой Тихо Браге в диапазоне энергий 0,8 – 30 ТэВ, $F(E_0 > 0,8 \text{ ТэВ}) \sim E^k$, где $k = -1,00 \pm 0,12$ жёстче, чем спектр Крабовидной туманности, для которой $k = -1,40 \pm 0,07$.

Кинетическая нелинейная модель ускорения космических лучей в остатках сверхновых [34 – 37] была применена к Tycho's SNR для сравнения результатов модели с недавно полученными в наблюдениях очень низкими верхними пределами потока гамма-квантов при ТэВ-ных энергиях. Фактически, HEGRA не обнаружила Тихо Браге, но был установлен очень низкий верхний предел при энергиях > 1 ТэВ. Эта величина находится в согласии с в 4 раза более высоким значением, опубликованным ранее коллаборацией Whipple, если полагать при сравнения спектральный индекс равный -1,1.

Остаток сверхновой Тихо типа Ia наблюдался атмосферным Черенковским телескопом ШАЛОН высокогорной обсерватории на Тянь-Шане. Этот объект уже давно рассматривается как кандидат в источники адронов космических лучей в Северном Полушарии, хотя казалось, что чувствительность существующего поколения черенковских телескопов возможно слишком мала для его обнаружения. На рисунке 9 представлены результаты наблюдения Тихо Браге по данным телескопа ШАЛОН вместе с теоретическими предсказаниями для данного источника гамма-квантов.

Поток γ -квантов от распада π^0 оказался несколько больше, чем поток от обратного комптоновского рассеяния при 1 ТэВ, и сильно доминирующим над ним при 10ТэВ. Предсказанный поток гамма-квантов находится в согласии с верхними пределами опубликованными Whipple и HEGRA.

Ожидаемый поток гамма-квантов от распада π^0 : $F_\gamma \sim E^{-1}$ простирается до ~ 30 ТэВ, тогда как поток гамма-лучей рождённых в процессе обратного комптоновского рассеяния обрезается выше нескольких ТэВ [34 – 37]. Таким образом, регистрация телескопом ШАЛОН гамма-квантов от остатка сверхновой Тихо при энергиях 10 – 80 ТэВ является свидетельством адронного происхождения гамма-квантов в данном объекте.

На рисунке 9 представлено спектральное энергетическое распределение гамма-квантов от Тихо Браге рассчитанное [34, 36] в предположении энергии взрыва сверхновой равной $E_{SN} = 1,2 \times 10^{51}$ эрг для четырёх расстояний d и соответствующих плотностей межзвёздной среды N_H . Дополнительная информация о параметрах источника Тихо Браге получена в рамках нелинейной кинетической теории [34 – 37] из данных телескопа ШАЛОН (рис. 9): расстояние d находится в пределах 3,1 – 3,3 кпк, плотность межзвёздной среды $N_H = 0,4 – 0,5 \text{ см}^{-3}$, при этом поток гамма-квантов от распада π^0 будет простирается почти до 100 ТэВ.

Выводы.

В процессе выполнения работы:

- Проведен монтаж, наладка и калибровка спектрометрических трактов телескопов ШАЛОН-1 и ШАЛОН-2. Стабильность и динамический диапазон спектрометрических трактов телескопов удовлетворяют требованиям эксперимента.

- Выполнен монтаж, настройка и калибровка новой системы гидирования телескопов ШАЛОН-1 и ШАЛОН-2. В результате усовершенствования системы движения и наведения на источник повышена точность ведения источника и существенно увеличено полезное время наблюдений.
- Показана эффективность используемых критериев отбора.
- На телескопе ШАЛОН проведены наблюдения галактических источников Крабовидная туманность и Тихо Браге.
- Автоматизированы программы обработки данных наблюдений.
- Проведена полная обработка полученного экспериментального материала и получены характеристики наблюдаемых источников в области энергий $>0,8\text{ТэВ}$, такие как потоки гамма-квантов сверхвысоких энергий, интегральные спектры, изображения источников, энергетические изображения источников, спектральные энергетические распределения.
- По данным наблюдений телескопом ШАЛОН для остатка сверхновой Крабовидная туманность показано, что гамма-кванты при энергиях выше $0,8\text{ ТэВ}$ генерируются в процессе обратного комптоновского рассеяния оптических фотонов на релятивистских электронах в области со средним значением величины магнитной индукции $\sim 67\text{нТ}$ на расстояниях до $1,5'$ от пульсара.
- Впервые были получены характеристики остатка сверхновой Тихо при сверхвысоких энергиях. Ожидаемый поток гамма-квантов от распада π^0 : $F_\gamma \sim E^{-1}$ простирается до $\sim 30\text{ТэВ}$, тогда как поток гамма-лучей рождённых в процессе обратного комптоновского рассеяния обрезается выше нескольких ТэВ [34 – 37]. Таким образом, регистрация телескопом ШАЛОН гамма-квантов от остатка сверхновой Тихо при энергиях $10 - 80\text{ ТэВ}$ является свидетельством адронного происхождения гамма-квантов в данном объекте. Дополнительная информация о параметрах источника Тихо Браге получена из данных телескопа ШАЛОН в рамках нелинейной кинетической теории [34, 37]: расстояние d находится в пределах $3,1 - 3,3\text{ кпк}$, плотность межзвёздной среды $N_H = 0,4 - 0,5\text{ см}^{-3}$, при этом поток гамма-квантов от распада π^0 будет простирается почти до 100 ТэВ .

Публикации автора по теме диссертации

1. V.G. Sinitsyna, A.Y. Alaverdyan, T.P. Arsov, S.P. Vorobiov, I.A. Ivanov, R.M. Mirzafatihov, S.I. Nikolsky, G.F. Platonov, V.Y. Sinitsyna, V.B. Striguin, // *Extragalactic Sources of Gamma-Quanta in Comparison with Galactic Sources of Gamma-Quanta TeV Observation / Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 1998, vol. 75A, pp.352-355.
2. В.Г.Синицина, А.Ю.Алавердян, Т.П. Арсов, С.П.Воробьев, И.А. Иванов, Р.М.Мирзафатихов, С.И.Никольский, В.Ю. Синицина, В.Б.Стригин, Г.Ф.Платонов // *Метагалактические и галактические источники гамма-квантов с энергией более 10^{12}эВ* / Изв. РАН, Сер. Физ., 1999, т.63, №3, с. 610-612.
3. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, A.Y. Alaverdyan, I.A. Ivanov, S.I. Nikolsky, F.M. Musin, R.M. Mirzafatihov, G.F. Platonov, V.Y. Sinitsyna, A.N. Galitskov, I.V. Oblakov, // *The TeV Gamma-Ray Emission From Point Sources: Galactic And Extragalactic / Nuclear Physics B(Proc. Suppl.)*, 2001, vol. 97, pp. 215-218.

4. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, A.Y. Alaverdyan, J.N. Capdevielle*, I.A. Ivanov, S.I. Nikolsky, F.M. Musin, R.M. Mirzafatihov, G.F. Platonov, V.Y. Sinitsyna, A.N. Galitskov, I.V. Oblakov; // *Evidence of TeV Gamma-Ray Radiation in Supernova Remnants Cygnus X-3/ Nuclear Physics B(Proc. Suppl.)*, 2001, vol. 97, pp. 219-222.
5. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, S.S. Borisov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, G.M. Kasparov, R.M. Mirzafatikhov, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov, // *Efficiency of selection of gamma - quanta from a proton background in experiment SHALON on observation results of extragalactic sources NGC1275, 1739+522, 3c454.3 and Mkn 421, Mkn501 / Universal Academy Press, Inc. ed. M.Mori, 2003, pp. 383-389.*
6. V.G. Sinitsyna, S.I. Nikolsky, S.S. Borisov, V.Y. Sinitsyna, // *Extensive Air Showers Generated by Protons, Nuclei, Gamma-quanta and Neutrinos at Energy Range 1 - 100 TeV / Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 2003, vol. 122, pp. 247 - 250.
7. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, A.Y. Alaverdian, S.S. Borisov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, G.M. Kasparov, R.M. Mirzafatikhov, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov, // *Observed and Expected TeV Gamma-Ray Emission from Geminga and Tycho's Supernova Remnants / Universal Academy Press, Inc., 2003, pp. 2369 – 2370.*
8. В.Г. Синицина, Т.П. Арсов, С.С. Борисов, С.И. Никольский, Ф.И. Мусин, В.Ю. Синицина, Г.Ф. Платонов // *Гамма-кванты сверхвысоких энергий от галактических источников - остатков сверхновых Геминга и Тихо Браге (1- 30ТэВ) и двойной звёздной системы Лебедь X-3 (1-65 ТэВ) / Изв. РАН, Сер. Физ., 2005, т. 69, № 3, стр. 422 – 427.*
9. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, A.Y. Alaverdian, S.S. Borisov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov // *Observed and expected 1-30 TeV gamma-ray emission from Geminga and Tycho's supernova remnants / International Journal of Modern Physics A (IJMPA)*, 2005, vol. 20, №29, pp. 7026.
10. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, S.S. Borisov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov // *Tycho's SNR as the source of cosmic rays and gamma-quanta with energy of 1 - 30 TeV in Galaxy / Proc. of 29th ICRC, Pune, 2005, vol. 4, pp. 231 – 235.*
11. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, S.S. Borisov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov, // *TeV Gamma-ray Emission Observed and Expected from Supernova Remnants Tycho Brage and Geminga / in Toward a Major Atmospheric Cherenkov Detector - VII, ed. B. Degrange, G. Fontain, (Ecole Polytechnique), 2005, pp. 105 – 111.*
12. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, S.S. Borisov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov // *Extensive air showers generated by gamma-quanta from Geminga and Tycho's SNR at energy range 1-30TeV / Nuclear Physics B (Proc.Suppl.)*, 2006, vol.151, pp.112–115.
13. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov // *Cosmic ray and TeV gamma-ray production in Tycho and Geminga supernova remnants / Proc. 20ECRS, Lisbon, 2006, S5 – 53.*
14. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, A.A. Malysheva S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov, // *TeV gamma-rays from Galactic sources: Tycho's SNR, Geminga and Crab Nebula / Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 2008, vol.175-176C, pp.455 – 458.
15. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov, // *TeV to PeV neutrinos and gamma-rays with Mountain SHALON Mirror Cherenkov Telescope / Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 2008, vol.175-176C, pp.451 – 454.
16. V.Y. Sinitsyna, // *Cosmic ray and TeV gamma-ray production in Tycho and Geminga supernova remnants / Proc. ICRW «Aragats-2007», ed. by B. Pattison and R. Martirosov, 2008, pp. 23 - 27.*
17. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov, // *Cosmic ray and TeV gamma-ray production in Tycho and Geminga supernova remnants / Proc. of 30th ICRC, eds. Rogelio Caballero, Juan D'Olivo, Gustavo Medina-Tanco, Lukas Nellen, Federico A. Sánchez, José F. Valdés-Galicia, Universidad Nacional Autónoma de México, 2008, vol. 2 (OG part1), pp. 543 – 546.*

18. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, A.Y. Alaverdian, S.S. Borisov, R.M. Mirzafatikhov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov, // *Galactic sources at TeV energy: Flaring activity of Cygnus X-3 and new binary 2129+47XR* / Proc. of 30th ICRC, eds. Rogelio Caballero, Juan D'Olivo, Gustavo Medina-Tanco, Lukas Nellen, Federico A. Sánchez, José F. Valdés-Galicia, Universidad Nacional Autónoma de México, 2008, vol. 2 (OG part1), pp. 547 – 550.
19. V.G. Sinitsyna, F. I. Musin, S. I. Nikolsky, and V. Y. Sinitsyna, // *TeV Gamma and Cosmic Ray Production in Supernova Remnants* / Journal of the Physical Society of Japan, 2009, vol. 78, Supplement A, pp. 197-201.
20. V.G. Sinitsyna, A.Y. Alaverdyan, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, // *10 years of Flaring activity of Cygnus X-3 and new galactic Binary 2129+47XR* / Proc. 21st ECRC (ISBN 978-80-968060-5-8), ed. K. Kudela, Printed by VIENALA s.r.o., 2009, pp. 573– 579.
21. V.G. Sinitsyna, S.S. Borisov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, // *The prediction of a synchrotron self-compton emission model compared with VHE spectral energy distributions of Crab Nebula* / Proc. 21st ECRC (ISBN 978-80-968060-5-8), ed. K. Kudela, Printed by VIENALA s.r.o., 2009, pp. 579 – 584.
22. V.G. Sinitsyna, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, G.F. Platonov // *Geminga and Tycho' SNR viewed in TeV gamma rays* / Proc. 21st ECRC (ISBN 978-80-968060-5-8), ed. K. Kudela, 2009, pp. 584 – 589.
23. V.G. Sinitsyna, S.S. Borisov, F.I. Musin, S.I. Nikolsky, V.Y. Sinitsyna, // *A Synchrotron self-Compton emission model compared with VHE spectrum of Crab Nebula, Geminga energy spectra and hadronic gamma-rays in Tycho SNR* / Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 2009, vol. 196, pp. 433 – 436.
24. V.Y. Sinitsyna, // *Cygnus X-3 Flaring activity during 10 years of observations and new galactic binary 2129+47XR* / Proc. XXth Rencontres de Blois, "Challenges in Particle Astrophysics" ed. Jacques Dumarchez and Jean Tran Thanh Van, "The Gioi" Publishers, 2009, pp. 313 – 316.
25. V.G. Sinitsyna, V.Y. Sinitsyna // *TeV Gammas and Cosmic ray production in Tycho's SNR and Geminga* / XLIVth Rencontres De Moriond, "Very High Energy Phenomena in the Universe", La Thuile, Aosta Valley, Italy, February 2009, in press

Литература.

26. В.С. Березинский, С.В. Буланов, В.Л. Гинзбург, В.А. Догель, В.С. Птускин (под ред. В.Л. Гинзбурга), // *Астрофизика космических лучей* / - М.: "Наука", 1984.
27. S. P. Reynolds, *Annu. Rev. Astron. Astron.*, 2008, vol. 46, pp. 89-125.
28. Е.Г. Бережко, Г.Ф. Крымский, // *Ускорение космических лучей ударными волнами / УФН*, 1988, т. 154 №1, стр. 49.
29. S.I.Nikolsky, V.G.Sinitsyna, // *Зеркальный многоэлементный гамма-телескоп для высокогорных наблюдений черенковского изучения атмосферных ливней с энергий ~1 ТэВ "SHALON-ALATOO" / VANT, TFE, 1987 vol. 1331, pp. 30-36; S.I. Nikolsky, V.G.Sinitsyna, // Investigation of gamma-sources by morror telescopes / Proc. International Workshop of VHE gamma-ray astronomy, ed. by A.A. Stepanian, D.J. Fegan, W. F. Cawley, Crimea, 1989, pp.11-21.*
30. В.Г.Синицина, С.И.Никольский, и др., // *Возможности для наблюдения гамма-квантов от локальных источников зеркальными черенковскими телескопами ШАЛОН-АЛАТОО / Изв.АН, сер. физ., 1993, т. 54, N 4, стр. 174-176.*
31. А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин, // *Методы решения некорректных задач/ М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979, Изд.2.*
32. V.G. Sinitsyna, T.P. Arsov, A.Y. Alaverdyan, I.A. Ivanov, S.I. Nikolsky, F.M. Musin, R.M. Mirzafatihov, G.F. Platonov, V.Y. Sinitsyna, A.N. Galitskov, I.V. Oblakov, and J.N. Capdevielle, // *Detection of the new active galactic sources NGC 1275, 3c454.3 and*

- 1739+522 in comparison with other previously observed metagalactic and galactic sources / *Nuovo Cimento*, 2001, vol. 24C № 4-5, pp. 785 – 795.
33. A. M. Hillas, et al., *ApJ*, 1998, vol. 503, p. 744.
 34. H. J. Völk, E. G. Berezhko and L. T. Ksenofontov, in *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf.*, Pune, 2005, vol. 3, p. 235.
 35. H. J. Völk, E. G. Berezhko and L. T. Ksenofontov and G.P. Rowell // The high energy gamma-ray emission expected from Tycho's supernova remnant / *A&A*, 2000, vol. 396, pp. 649 – 656.
 36. E. G. Berezhko, in *Proc. 27th ICRC, Hamburg, Invited, Rapporteur and Highlight papers of ICRC 2001*, pp. 226 – 233.
 37. E. G. Berezhko, L. T. Ksenofontov and H. J. Völk, // Gamma-ray emission expected from Kepler's SNR / *Astrophysics and Space Science*, 2007, vol. 309, pp. 385-388.
 38. V.G. Sinitsyna // SHALON-ALATOO Cherenkov Radiation of Extensive Air Showers observed at Large Zenith Angles / *Proceedings of the International Workshop for TeV Astro/Particle Physics "Towards a Major Atmospheric Cherenkov Detector - II"*, Calgary, Canada, ed. R. C. Lamb, 1993, pp.91– 100.
 39. А.А. Беляев, И.П. Иваненко, Б.А. Канаевский, Т.М. Роганова и др., //Электронно-фотонные каскады в космических лучах при сверхвысоких энергиях / . М., 1980.
 40. Г.Б. Христиансен, Г.В. Куликов, Ю.А. Фомин, // Космическое излучение сверхвысоких энергий / , М., 1975.
 41. И.П. Иваненко, Б.А. Канаевский, Т.М. Роганова, // *Ядерная физика* / 1979, т.29.
 42. В.А. Канцеров, В.Б. Стригин, // Широкодиапазонный преобразователь заряд-код / ПТЭ, 1987, стр. 80.
 43. A.M. Hillas, *Proc. of the 19th ICRC, La Jolla, USA, 1985*, vol. 3, p. 445.
 44. P. T.Reynolds, et al., *ApJ*, 1993, vol. 404, p. 206.
 45. V.G.Sinitsyna, // SHALON-ALATOO / *Proc. of Workshop for TeV Astro/Particle Physics Towards a Major Cherenkov Detector – I* ed. P. Fleury and G. Vacanti, Paris, 1992, pp. 299 – 304.
 46. R. J. Gould, *Phys. Rev. Lett.*, 1965, vol. 15, p. 577.
 47. O. C. de Jager and A. K. Harding, *ApJ*, 1992, vol. 396, p. 161.
 48. T.-P. Li, & Y.-Q. Ma, *ApJ*, 1983, vol. 272, p. 317.
 49. F. D.Seward, W.H. Tucker and R.A.Fesen, *Astrophys.J.*, 2006, vol. 652, pp. 1277–1287.