

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 520.6.05

Топчиев Николай Петрович

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ И СОЗДАНИЕ НАУЧНОЙ
АППАРАТУРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ И
СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ**

Специальность

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2017 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Института ядерных исследований РАН
Стенькин Юрий Васильевич

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Панов Александр Дмитриевич

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Национального Исследовательского Центра «Курчатовский Институт» - Института Физики Высоких Энергий им. А.А. Логунова
Васильев Александр Николаевич

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук.

Защита состоится 25 декабря 2017 года в 12.00 на заседании совета Д 002.023.04 по защите докторских и кандидатских диссертаций Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, конференц-зал, по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте www.lebedev.ru, с авторефератом – на сайте ФИАН www.lebedev.ru.

Автореферат разослан _____.

дата

Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу: 119991 ГСП-1 г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН, Отделение ядерной физики и астрофизики.

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

С.П. Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Последние несколько десятилетий ознаменовались новым этапом в развитии астрономии, обусловленным активными наблюдениями во всех диапазонах электромагнитного спектра – от низкочастотного радиоизлучения до гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий. Диапазоны, в которых ранее не велись наблюдения, успешно осваиваются с помощью внеатмосферных средств: высотных аэростатов, спутников, космических станций, обсерваторий и т.п. Более того, возможность наблюдения во всех диапазонах длин волн позволила реализовать комплексный подход в исследованиях астрофизических объектов. Примерами этого являются исследования нашей Галактики, Крабовидной туманности, Солнца и многих других объектов, проведенные с помощью радиоастрономического, оптического, инфракрасного, рентгеновского и гамма-астрономического методов наблюдения.

Значительный вклад в астрофизические исследования вносит гамма-астрономия, которая изучает диапазон электромагнитного спектра с частотой более 2×10^{19} Гц, что соответствует энергии фотонов более 100 кэВ. Многочисленные исследования, проведенные в этой области, позволили открыть галактическое диффузное гамма-излучение, изотропное внегалактическое гамма-излучение, обнаружить и исследовать многочисленные галактические и внегалактические гамма-источники, провести исследования гамма-линий (511 кэВ от аннигиляции позитронов, 1808,63 кэВ от ^{26}Al , 1773 и 1332 кэВ от ^{60}Fe и др.), гамма-всплесков, исследовать гамма-излучение от Солнца. Все эти исследования в основном выполнены с помощью приборов, устанавливаемых на космических аппаратах.

Исследование гамма-излучения высоких энергий ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких энергий ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) позволяет получать уникальную информацию:

- о физических условиях в дискретных астрофизических объектах: активных звездах, остатках сверхновых (пульсарах), двойных звездах, черных дырах, микроквазарах, галактиках с активными ядрами, в которых происходит генерация и ускорение частиц (электронов, позитронов, протонов, ядер);
- о свойствах межзвездного и межгалактического пространства (состав и плотность вещества, напряженность магнитных полей), в котором происходит распространение и взаимодействие высокоэнергичных космических заряженных частиц, в результате которого появляется высокоэнергичное диффузное гамма-излучение;
- о физических процессах, происходящих на Солнце во время вспышек;
- о природе «темной материи», распределении плотности «темной материи» в Галактике и Вселенной, аннигиляции и распаде гипотетических частиц, составляющих «темную материю».

«Проблему темной материи и ее детектирования» нобелевский лауреат академик В.Л. Гинзбург отметил в списке особо важных проблем современной астрофизики на начало XXI века, которую можно решить методами гамма-астрономии.

Прямые внеатмосферные исследования гамма-излучения на космических аппаратах имеют значительное преимущество в связи с тем, что гамма-излучение проходит через Галактику до взаимодействия с атмосферой Земли практически без поглощения и искривления магнитными полями и прямо указывает на источник своего происхождения. При взаимодействии с атмосферой Земли гамма-излучение поглощается и создает широкие атмосферные ливни и черенковское излучение, которые регистрируются

наземными установками. Наземные гамма-телескопы регистрируют гамма-излучение, начиная с энергии ≥ 100 ГэВ.

Внеатмосферные исследования гамма-излучения на космических аппаратах проводятся различными методами, основанными на разных процессах взаимодействия гамма-излучения с веществом в зависимости от энергии гамма-квантов. В области энергий от 0,1 МэВ до 10-20 МэВ используются методы регистрации гамма-излучения, основанные на процессах фотоэффекта и комптоновского рассеяния. Для гамма-излучения с энергией более 10-20 МэВ основным процессом взаимодействия является конверсия гамма-квантов с образованием электрон-позитронных пар.

Методы разработки и создания аппаратуры для регистрации гамма-излучения меняются с ростом энергии.

В первых исследованиях гамма-излучения на космических аппаратах использовались небольшие по размерам и массе детекторы, которые позволяли определять направление гамма-квантов с точностью в нескольких градусах и измерять их энергию с точностью до нескольких десятков процентов.

Значительный вклад в развитие методики исследования космического гамма-излучения внес гамма-телескоп ГАММА-1 [1], методы разработки которого позволили существенно повысить угловое разрешения до ~ 1 градуса и улучшить энергетического разрешения до $\sim 35\%$. Большое значение в этом космическом эксперименте придавалось выделению гамма-квантов на фоне потока заряженных частиц космических лучей, превышающего на 4-5 порядков поток гамма-квантов. Для эффективного наблюдения гамма-источников впервые в мировой практике применялась переориентации космического аппарата с гамма-телескопом ГАММА-1. По прогнозу предвспышечной активности Солнца также проводилась переориентация космического аппарата на Солнце для наблюдения солнечных вспышек.

В настоящее время, гамма-астрономические наблюдения, которые осуществлялись в космосе (ГАММА-1, EGRET, AGILE, Fermi-LAT) и на Земле (H.E.S.S., MAGIC, VERITAS, HAWC), позволили получить большой объем новой информации о высокоэнергичном космическом гамма-излучении. Однако для решения вышеперечисленных актуальных научных задач очевидно, что необходимо разрабатывать гамма-телескопы нового поколения с существенно лучшими угловым и энергетическим разрешениями для прямой регистрации гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах. Именно, таким уникальным прибором нового поколения станет гамма-телескоп ГАММА-400 [2], который будет входить в состав российской космической обсерватории.

ЦЕЛЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Целью данной диссертационной работы является разработка новых методов и создание научной аппаратуры, позволяющей проводить измерения первичного гамма-излучения с высокими угловым и энергетическим разрешениями при астрофизических исследованиях дискретных источников, диффузного гамма-излучения, гамма-излучения от солнечных вспышек, гамма-излучения при аннигиляции или распаде частиц «темной материи» в диапазоне высоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) энергий на космических аппаратах.

Для достижения целей работы были поставлены и решены следующие **ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ**:

1. Анализ актуальных научных задач, решаемых методами гамма-астрономии при исследовании космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий.
2. Анализ существующих методов регистрации гамма-излучения на космических аппаратах, определение требований к научной аппаратуре для исследования космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий и определение оптимальной физической схемы.

3. Разработка новых методов и создание научной аппаратуры в эксперименте ГАММА-1 и анализ полученных результатов.
4. Разработка новых методов и создание научной аппаратуры с уникальными характеристиками для проведения астрофизических исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий в космической миссии «ГАММА-400».

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Основным результатом работы явилась разработка новых методов и создание научной аппаратуры – гамма-телескопа нового поколения с уникальными характеристиками для проведения астрофизических исследований на космических аппаратах гамма-излучения от дискретных источников, диффузного гамма-излучения, гамма-излучения от солнечных вспышек, гамма-излучения при аннигиляции или распаде частиц «темной материи» в диапазоне высоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) энергий. При регистрации гамма-квантов с энергией 100 ГэВ угловое и энергетическое разрешения гамма-телескопа составляют $\sim 0,01^\circ$ и $\sim 1\%$, соответственно, что превышает характеристики зарубежных космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработаны и реализованы новые методы создания научной аппаратуры для проведения на космических аппаратах астрофизических исследований высокоэнергичного гамма-излучения. В эксперименте ГАММА-1 впервые было зарегистрировано высокоэнергичное (до нескольких ГэВ) гамма-излучение при солнечных вспышках, впервые в мировой практике была применена переориентация космического аппарата с гамма-телескопом для эффективного наблюдения гамма-источников и солнечных вспышек. В гамма-телескопе ГАММА-400, который предназначен

для исследования космического гамма-излучения в диапазоне высоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) энергий на высокоапогейной орбите, позволяющей проводить длительные (до 100 суток) непрерывные наблюдения, получены уникальные характеристики (угловое и энергетическое разрешения составляют $\sim 0,01^\circ$ и $\sim 1\%$ при регистрации гамма-квантов с энергией 100 ГэВ). Полученные характеристики превышают характеристики зарубежных космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз. Это позволит получить новые данные для идентификации многих дискретных гамма-источников, данные о физических условиях в этих объектах, о свойствах межзвездного и межгалактического пространства (состав и плотность вещества, напряженность магнитных полей), о физических процессах, происходящих на Солнце во время вспышек, а также данные для определения природы «темной материи» во Вселенной, развития теории происхождения и ускорения космических лучей, физики элементарных частиц и использовать их при проектировании научной аппаратуры для исследования гамма-излучения, космических лучей, солнечных вспышек на космических аппаратах, а также в разработках экспериментальной ядерно-физической аппаратуры для проведения экспериментов на ускорителях.

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность полученных результатов при разработке и реализации новых методов создания научной аппаратуры – гамма-телескопа нового поколения с уникальными характеристиками для астрофизических исследований гамма-излучения высоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) энергий на космических аппаратах подтверждается многочисленными расчетами и экспериментами, в том числе при разработке и во время эксперимента ГАММА-1.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Проведение анализа современного состояния исследования дискретных источников, диффузного излучения и природы темной материи методами высокоэнергичной гамма-астрономии как в космических ($E_\gamma = \sim 100 \text{ МэВ} - \gtrsim 300 \text{ ГэВ}$), так и в наземных ($E_\gamma \gtrsim 100 \text{ ГэВ}$) экспериментах показало необходимость:

- непрерывных длительных измерений для получения хорошей статистики и изучения переменности астрофизических объектов;

- повторных измерений в связи с переменностью многих астрофизических объектов;

- расширения энергетического диапазона в сторону больших энергий (до нескольких ТэВ) для исследования пограничного диапазона энергий между космическими и наземными гамма-телескопами (в районе 100 ГэВ);

- улучшения энергетического разрешения научной аппаратуры для повышения точности измерений и разрешения гамма-линий при аннигиляции или распаде частиц «темной материи»;

- улучшения углового разрешения научной аппаратуры для идентификации астрофизических объектов и изучения структуры протяженных источников;

- создания гамма-телескопа нового поколения с большой площадью и улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

2. Проведение анализа существующих методов регистрации гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах и требований к научной аппаратуре показало, что для решения актуальных астрофизических задач методами высокоэнергичной гамма-астрономии необходима научная аппаратура нового поколения, которая должна иметь:

- большую чувствительную площадь $\sim 1 \text{ м}^2$;

- широкий энергетический диапазон от $\sim 100 \text{ МэВ}$ и до нескольких ТэВ;

- высокое энергетическое разрешение $< 2\%$ при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- высокое угловое разрешение $< 0,05$ градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- эффективную систему выделения гамма-квантов на фоне заряженных частиц;

- эффективную систему исключения из регистрации частиц «обратного тока»;

- возможность одновременно с наблюдением гамма-излучения регистрировать электроны и позитроны космического излучения.

3. В результате разработки новых методов, создания и проведения наблюдений на гамма-телескопе ГАММА-1, разработан гамма-телескоп ГАММА-400, в котором реализованы новые методы создания научной аппаратуры для проведения астрофизических исследований в диапазоне высоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ МэВ) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ) энергий с уникальными характеристиками, превышающими характеристики космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз и который обладает:

- высокочувствительной координатной системой, позволяющей регистрировать гамма-кванты с высокой точностью и получать угловое разрешение $\sim 0,01$ градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- высокоэффективным координатно-чувствительным калориметром, позволяющим регистрировать гамма-кванты в диапазоне от ~ 100 МэВ до ~ 1000 ГэВ с энергетическим разрешением $\sim 1\%$ при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- высокоэффективными антисовпадательной и времяпролетной системами, способными выделять гамма-кванты на фоне заряженных частиц;

- высокоэффективной системой для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающих при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ;

- высокоэффективной системой режекции протонов при одновременной регистрации с гамма-квантами электронов + позитронов.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты работы неоднократно докладывались соискателем и обсуждались на российских и международных конференциях, основные из которых:

1. Газовый черенковский счетчик в эксперименте ГАММА-1. Первый международный семинар социалистических стран «Научное космическое приборостроение», Фрунзе, 1976.
2. Лабораторный макет гамма-телескопа ГАММА-1. Второй международный семинар социалистических стран «Научное космическое приборостроение», Фрунзе, 1978.
3. Калибровка систем гамма-телескопа ГАММА-1 на ускорителях. Третий международный семинар социалистических стран «Научное космическое приборостроение», Одесса, 1982.
4. Калибровка гамма-телескопа ГАММА-1 в пучке «меченых» гамма-квантов. Совещание по проблемам гамма-астрономии высоких и сверхвысоких энергий, Ташкент, 1986.
5. К вопросу о роли альбедо из калориметра телескопа «ГАММА-400» при регистрации первичного гамма-излучения. Международная конференция по космическим лучам, Москва, 1996 г.
6. Российский вариант телескопа для регистрации диффузного гамма-излучения в области энергий 10-1000 ГэВ. 28-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 2004 г.
7. Разработка гамма-телескопа ГАММА-400 для регистрации космического гамма-излучения с энергиями до 1 ТэВ. 29-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 2006 г.
8. Модернизированный гамма-телескоп ГАММА-400 для регистрации космического гамма-излучения с энергиями до 3 ТэВ. 30-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Санкт-Петербург, 2008 г.

9. Научные задачи и современное состояние проекта «ГАММА-400». 31-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 2010 г.
- 10.2010: Status of the GAMMA-400 project. 38-я сессия COSPAR-2010, Германия, Бремен, 2010 г.
11. Возможности гамма-телескопа ГАММА-400 регистрировать частицы темной материи. Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, НИЯУ МИФИ, Москва, 2012 г.
12. The space-based gamma-ray telescope GAMMA-400 and its scientific goals. 33-я Международная конференция по космическим лучам, Бразилия, Рио-де-Жанейро, 2013 г.
13. New generation high-energy space observatory GAMMA-400. 40-я сессия COSPAR-2014, МГУ, Москва, 2014 г.
14. Эксперимент ГАММА-400: состояние и перспективы. 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, ОИЯИ, Дубна, 2014 г.
15. Новые методы разработки научной аппаратуры для регистрации гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий в космическом эксперименте ГАММА-400 с учетом эксперимента ГАММА-1. Восьмые Черенковские чтения, ФИАН, Москва, 2015 г.
16. The GAMMA-400 gamma-ray observatory. 34-я Международная конференция по космическим лучам, Нидерланды, Гаага, 2015 г.
17. The GAMMA-400 gamma-ray telescope for precision gamma-ray emission investigations. ICPPA-2015 (International Conference on Particle Physics and Astrophysics). Москва, 2015 г.
18. New stage in high-energy gamma-ray studying with GAMMA-400 after Fermi-LAT. ISVHECRI 2016 (International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions), Москва, 2016 г.
19. High-energy gamma-ray studying with GAMMA-400 after Fermi-LAT. ICPPA-2016 (International Conference on Particle Physics and Astrophysics). Москва, 2016 г.

20. V.L. Ginzburg and gamma-ray astronomy: from GAMMA-1 to GAMMA-400. Ginzburg centennial conference on physics. Москва, 2017 г.
21. High-energy gamma-ray studying with GAMMA-400. 35-я Международная конференция по космическим лучам, Южная Корея, Пусан, 2017 г.

ПУБЛИКАЦИИ

В основу диссертационной работы положены материалы 36 статей, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus, в том числе 16 статей в российских журналах, рекомендованных ВАК.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Соискатель внес основной вклад на следующих этапах работы: постановка задач, разработка и создание гамма-телескопов, разработка и испытание методик проведения экспериментов, постановка и проведение измерений в космическом пространстве. Аналитические расчеты, компьютерное моделирование и обработка экспериментальных данных осуществлялись при непосредственном участии соискателя. Оформлению публикаций предшествовали коллективные обсуждения. Тексты многих публикаций написаны либо лично, либо при непосредственном участии соискателя.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Объем работы - 243 страницы, включая 98 рисунков, 17 таблиц. Список литературы состоит из 174 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во **Введении** раскрывается актуальность проблемы, цель работы, научная новизна, научная и практическая значимость, полученных результатов, достоверность полученных результатов, апробация работы, публикации и личный вклад автора.

В **Главе 1** проводится анализ актуальных научных задач, решаемых методами гамма-астрономии высоких и сверхвысоких энергий по исследованию гамма-излучения от дискретных источников в космических и наземных экспериментах, исследованию диффузного гамма-излучения в космических и наземных экспериментах, исследованию высокоэнергичного гамма-излучения от Солнца, исследованию природы «темной материи», которые позволят получить уникальную информацию:

- о физических условиях в дискретных астрофизических объектах: активных звездах, остатках сверхновых (пульсарах), двойных звездах, черных дырах, микроквазарах, галактиках с активными ядрами, в которых происходит генерация и ускорение частиц (электронов, позитронов, протонов, ядер);
- о свойствах межзвездного и межгалактического пространства (состав и плотность вещества, напряженность магнитных полей), в котором происходит распространение и взаимодействие высокоэнергичных космических заряженных частиц, в результате которого появляется высокоэнергичное диффузное гамма-излучение;
- о физических процессах, происходящих на Солнце во время вспышек;
- о природе «темной материи», распределении плотности «темной материи» в Галактике и Вселенной, аннигиляции и распаде гипотетических частиц, составляющих «темную материю».

Проведенные и проводимые в настоящее время исследования высокоэнергичного гамма-излучения как в космических ($E_\gamma = \sim 100$ МэВ – ≥ 300 ГэВ), так в наземных ($E_\gamma \geq 100$ ГэВ) экспериментах выявили следующее:

1. В космических экспериментах OSO-3 (1967-1968 гг.), Космос-208 (1968 г.), АННА-3 (Космос-251, 1968 г. и Космос-264, 1969 г.), OGO-5 (1968 г.), SAS-2 (1972-1973 гг.), COS-B (1975-1982 гг.), ГАММА-1 (1990-1992 гг.) [3-14], EGRET (1991-2000 гг.), AGILE (с 2007 г.), и в основном усилиями Fermi-LAT (с 2008 г.) обнаружено гамма-излучение от ~ 3030 дискретных источников, причем одна треть источников не идентифицирована, что связано с недостаточным угловым разрешением (Fermi-LAT имеет для $E_\gamma = 100$ ГэВ угловое и энергетическое разрешения $\sim 0,1^\circ$ и $\sim 10\%$, соответственно). Энергетические спектры гамма-излучения от дискретных источников для энергий более 10 ГэВ построены с большими ошибками. Требуются дополнительные измерения с улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

2. В наземных экспериментах Whipple, VERITAS, MAGIC, H.E.S.S., Milagro, HAWC и др. (наземные гамма-телескопы имеют для $E_\gamma = 100$ ГэВ угловое и энергетическое разрешения $\sim 0,1^\circ$ и $\sim 15\%$, соответственно) обнаружено гамма-излучение только от ~ 180 дискретных источников, что в основном связано с недостаточным угловым разрешением. Требуются дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением.

3. Наблюдение диффузного галактического гамма-излучения является инструментом изучения происхождения и ускорения космических лучей и межзвездного вещества. Знание диффузного излучения необходимо для его выделения от гамма-излучения дискретных (точечных и протяженных) источников. Интенсивность галактического диффузного гамма-излучения при энергии 10-50 ГэВ по измерениям Fermi-LAT меньше, чем по данным EGRET. Для интерпретации природы диффузного излучения требуются

дополнительные измерения с улучшенным угловым и энергетическим разрешениями.

4. Результаты измерений диффузного гамма-излучения от центра Галактики по данным Fermi-LAT выявили избыток излучения. Одним из возможных объяснений избытка гамма-излучения является наличие гамма-излучения от частиц темной материи с массой несколько сотен ГэВ. Другим объяснением избытка гамма-излучения от центра Галактики является наличие гамма-излучения от неразрешенных источников (например, маломасштабных субструктур темной материи) или от миллисекундных пульсаров. Для выделения дополнительного потока гамма-излучения от частиц темной материи необходимо из общего потока космического гамма-излучения вычесть диффузное излучение (галактическое и внегалактическое) и гамма-излучение от дискретных источников, а для этого необходимы дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением.

5. Сравнение спектра внегалактического гамма-излучения со спектрами излучения от идентифицированных внегалактических источников указывает на значительное долю в нем неразрешенных источников, для идентификации которых также требуется высокое угловое разрешение.

6. Поиск частиц темной материи путем регистрации гамма-квантов является чрезвычайно многообещающим «золотым» каналом, поскольку гамма-кванты распространяются через галактику практически без поглощения и искривления магнитными полями и прямо указывают на источник своего происхождения. Основная задача - выявление особенностей в энергетических спектрах в виде аномального (дополнительного) потока или выделение моноэнергетических гамма-линий из фонового потока гамма-излучения. Исследования Fermi-LAT и H.E.S.S. не выявили значимых спектральных линий. Для выделения таких линий над фоном энергетическое разрешение детекторов должно быть значительно лучше, чем у Fermi-LAT и H.E.S.S. и составлять величину порядка нескольких процентов. Требуются дополнительные измерения с улучшенным энергетическим разрешением.

7. Высокоэнергичное гамма-излучение ($E_\gamma > 1$ ГэВ) от солнечных вспышек впервые была зарегистрировано гамма-телескопом ГАММА-1 [15-20], в дальнейшем гамма-телескопами EGRET, Fermi-LAT. Однако, недостаточное угловое разрешение не позволило во многих случаях разрешить детали излучения, оставив открытым вопрос о размерах и геометрии источника. Требуется дополнительные измерения с улучшенным угловым разрешением.

Несмотря на многочисленные исследования высокоэнергичного гамма-излучения как в космических, так и в наземных экспериментах, необходимы новые экспериментальные данные, которые должны быть получены с использованием гамма-телескопов, установленных на космических аппаратах и обладающих значительно лучшими угловым и энергетическим разрешениями, способными проводить длительные непрерывные наблюдения, в связи с тем, что многие источники гамма-излучения являются переменными.

Особенно важным является исследование гамма-излучения на космическом аппарате одним гамма-телескопом в диапазоне энергий от \sim ГэВ до \sim ТэВ:

- это пограничная область, где заканчиваются данные космических гамма-телескопов и начинаются данные наземных гамма-телескопов. Эти данные либо слабо, либо совсем не перекрываются;

- в этой области, начиная с энергии более 10 ГэВ, начинаются процессы ослабления потоков гамма-излучения после взаимодействия с межгалактическими фоновыми фотонами (extragalactic background light, EBL) и происходит изменение показателя энергетического спектра гамма-излучения от источника;

- в этом энергетическом диапазоне следует искать следы от аннигиляции или распада частиц темной материи, где, как предполагается, должна находиться масса этих частиц.

Таким образом, для решения вышеперечисленных астрофизических задач необходимо разработать новую космическую научную аппаратуру, которая должна обеспечить регистрацию одним гамма-телескопом высокоэнергичного гамма-излучения в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ и будет иметь значительно лучшие характеристики: угловое разрешение $< 0,05^\circ$ при $E_\gamma = 100$ ГэВ и энергетическое разрешение $< 2\%$ при $E_\gamma = 100$ ГэВ.

В **Главе 2** проводится анализ существующих методов регистрации гамма-излучения в космических экспериментах: OSO-3, Космос-208, АННА-3, OGO-5, SAS-2, COS-B, ГАММА-1, COMPTEL, EGRET, AGILE, Fermi-LAT, CALET, DAMPE.

При взаимодействии гамма-квантов с конвертером в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ происходит конверсия с образованием электрон-позитронной пары. Далее различными методами регистрируются образовавшиеся электроны и позитроны. В гамма-телескопах используются сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы, искровые и дрейфовые камеры, черенковские детекторы (твердотельные и газообразные), калориметры на основе сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов.

В действующих в настоящее время космических экспериментах отмечается следующее:

В AGILE недостаточный диапазон измеряемых энергий ($E_\gamma < 50$ ГэВ) и недостаточное угловое $0,2^\circ$ ($E_\gamma = 10$ ГэВ) и энергетическое 50% ($E_\gamma = 1$ ГэВ) разрешения.

В Fermi-LAT:

- орбита круговая с высотой ~ 565 км с постоянной переориентацией аппарата на 180° , что не позволяет проводить непрерывные наблюдения гамма-источников;

- осуществляется постоянный обзор неба в режиме сканирования за 3 часа для поиска гамма-источников, что не дает возможность изучать зависимость светимости гамма-источника от времени, при этом реальное время наблюдения и детального исследования гамма-источников примерно в 8 раз меньше времени работы Fermi-LAT;

- антисовпадательная система имеет недостаточную эффективность регистрации заряженных частиц (всего 0,9997) и недостаточную эффективность исключения частиц «обратного тока»;

- конвертер-трекер запускает регистрацию гамма-квантов при срабатывании трех последовательных плоскостей стриповых детекторов, что вместе с недостаточной эффективностью антисовпадательной системы явно недостаточно для исключения фоновых событий. Как результат, нет никакой информации о регистрации гамма-квантов с энергией до 100 МэВ;

- стриповые детекторы имеют шаг всего 228 мкм и бинарным съём информации, что приводит к угловому разрешению только $\sim 0,1^\circ$ при $E_\gamma \gtrsim 100$ ГэВ;

- отсутствует времяпролетная система, которая позволила бы дополнительно исключать фоновые события;

- небольшое расстояние между конвертером-трекером и калориметром (~ 10 см) позволяет фоновым частицам «обратного тока», идущим от калориметра в направлении конвертера-трекера и антисовпадательной системы, искажать информацию о реальных гамма-квантах;

- толщина калориметра для частиц, попадающих в телескоп вдоль его оси, всего 8,5 р.е.д. и, в результате, недостаточная точность измерения энергии частиц для $E_\gamma > 300$ ГэВ и недостаточное энергетическое разрешение ($\sim 10\%$ при $E_\gamma = 100$ ГэВ).

В CALET небольшая чувствительная площадь $\sim 0,1$ м² и угловое разрешение только $0,2^\circ$ ($E_\gamma = 10$ ГэВ) при регистрации гамма-квантов. Кроме того, при работе на МКС создается дополнительное фоновое излучение от

вещества станции и ограничен выбор наблюдения астрофизических объектов.

В DAMPE небольшая чувствительная площадь $\sim 0,36 \text{ м}^2$ и угловое разрешение только $0,1^\circ$ ($E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$) при регистрации гамма-квантов.

Рассматривая различные методы регистрации гамма-квантов гамма-телескопами на космических аппаратах и требований к научной аппаратуре в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ можно сделать следующие выводы:

1. Использование искровых и дрейфовых камер требует постоянного внимания к газоразрядным системам, газовой смеси в камерах, ее регулярного перезаполнения. Газовые системы в условиях длительных космических полетах не обладают высокой надежностью.

2. При использовании газовых черенковских детекторов возникают такие же недостатки и к тому же для получения необходимых сигналов требуется большая длина детекторов.

3. Будущие космические гамма-телескопы для решения актуальных астрофизических задач должны проводить непрерывные, длительные измерения для получения хорошей статистики и для измерения вариаций светимости одновременно во всем диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ, иметь большую чувствительную площадь ($0,5\text{-}1 \text{ м}^2$), высокое угловое ($< 0,05^\circ$ при $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$) и энергетическое ($< 2\%$ при $E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}$) разрешения, и иметь в своем составе:

- антисовпадательные сцинтилляционные детекторы с высокой эффективностью регистрации заряженных частиц лучше $0,9999$;

- конвертеры-трекеры из кремниевых стриповых детекторов с высоким координатным разрешением, которые позволяют определять направление регистрируемых гамма-квантов с точностью лучше $0,05^\circ$;

- времяпролетные сцинтилляционные системы, позволяющие выделять направление регистрируемых гамма-квантов с временным разрешением лучше 0,5 нс;

- калориметры с большой толщиной (не менее 20 р.е.д.) на основе сцинтилляционных кристаллов, позволяющие регистрировать гамма-кванты в широком диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ с высоким энергетическим разрешением лучше 3%;

- детекторные системы для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающие при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ.

В **Главе 3** рассматриваются новые методы регистрации гамма-квантов и создание научной аппаратуры в эксперименте ГАММА-1 и проводится анализ полученных результатов.

Основным методом регистрации гамма-квантов в эксперименте ГАММА-1 с гамма-телескопом нового типа было использование комбинации детекторов: широкоазорной искровой камеры для конверсии гамма-квантов в электрон-позитронную пару и измерения направления падения гамма-квантов, сцинтилляционной времяпролетной системы с большой пролетной базой для исключения из регистрации частиц, попадающих в гамма-телескоп вне апертуры (снизу и сбоку), газового черенковского счетчика большой площади для исключения из регистрации частиц с энергией ниже порога возникновения черенковского излучения, антисовпадательной сцинтилляционной системы для исключения заряженных частиц, которая перекрывает широкоазорные искровые камеры сверху и с четырех боковых сторон, и сцинтилляционного калориметра для измерения энергии гамма-квантов.

Применение широкоазорных камер в ГАММА-1 позволило улучшить угловое разрешение почти в 2 раза по сравнению с телескопами SAS-2 и

COS-B, в которых использовались узкозачеренковские камеры, и достичь 2° при энергии фотонов 100 МэВ и $1,2^\circ$ при энергии 300 МэВ.

Применение ионизационного калориметра площадью $60 \times 60 \text{ см}^2$ толщиной 7,4 р.е.д. позволило получить энергетическое разрешение 55% при энергии 100 МэВ и 34% при энергии 550 МэВ.

Было уделено существенное внимание методам выделения гамма-квантов на значительном фоне заряженных частиц путем использования комбинации высокоэффективной антисовпадательной системы, времяпролетной системы и газового черенковского счетчика. Эффективность регистрации релятивистских частиц верхним торцевым антисовпадательным детектором составила $0,999997 \pm 0,000001$, а боковых антисовпадательных детекторов - 0,9994, наружным детектором - 0,99. Применение времяпролетной системы с большой пролетной базой ($\sim 75 \text{ см}$) позволило получить временное разрешение $\sim 1,2 \text{ нс}$, эффективность регистрации частиц в «прямом» направлении $\eta_{\text{пр}} = (96,1 \pm 0,6)\%$, в «обратном» - $\eta_{\text{обр}} = (0,06 \pm 0,01)\%$, коэффициент отбора по направлению составил $K_{\text{отб}} = 1600 \pm 270$. По сравнению с твердотельными черенковскими счетчиками (люсит), используемыми в SAS-2 и COS-B, применение газового черенковского счетчика (ГЧС) большой площади и длины ($\text{Ø}50 \text{ см}$ и $1 \sim 70 \text{ см}$) [21], обладающего хорошей направленностью благодаря малому углу черенковского излучения в газовой среде, позволило исключать из регистрации электроны с энергией менее 7 МэВ и протоны с энергией менее 12 ГэВ, в то время как пороговая энергия для люсита составляла всего 0,7 МэВ для электронов и 1,3 ГэВ для протонов. ГЧС обладал эффективностью регистрации $98,5 \pm 0,2\%$ в «прямом» направлении и $0,85 \pm 0,15\%$ в обратном, т.е. коэффициент отбора был более 100.

Представлено сравнение характеристик SAS-2, COS-B и ГАММА-1. Методы, разработанные в эксперименте ГАММА-1 позволили существенно

улучшить характеристики гамма-телескопа ГАММА-1 по сравнению с SAS-2 и COS-B.

Приведены научные результаты эксперимента ГАММА-1. Наблюдалось гамма-излучение от источников: пульсара PSR 0833-45 (Vela), пульсара Geminga, двойной системы Cyg X-3, двойной системы Hercules X-1. В 1991 г. в период максимума солнечной активности ГАММА-1 впервые зарегистрировал высокоэнергичное (до нескольких ГэВ) гамма-излучения от Солнца во время мощных вспышек 26 марта (класс 3В/Х4,7) и 15 июня (класс 3В/Х12+) 1991 г.

В **Главе 4** рассматриваются разработка новых методов и создание научной аппаратуры с уникальными характеристиками для астрофизических исследований гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах.

На основе анализа актуальных астрофизических задач, решаемых методами гамма-астрономии при исследовании гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий и анализа существующих методов регистрации гамма-излучения в космических экспериментах, в том числе эксперимента ГАММА-1, были разработаны и реализованы методы создания гамма-телескопа ГАММА-400 с уникальными характеристиками для проведения астрофизических исследований космического гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий [22-36].

В результате разработан гамма-телескоп нового поколения ГАММА-400, способный проводить длительные непрерывные наблюдения гамма-источников на высокоэллиптической орбите космической обсерватории с начальными параметрами: апогей 300 000 км, апогей 500 км, наклонение $51,4^\circ$, при которой поле зрения гамма-телескопа не затеняется Землей и космический аппарат находится, в основном, вне радиационных поясов Земли.

Гамма-телескоп ГАММА-400 содержит:

- антисовпадательные сцинтилляционные детекторы с высокой эффективностью регистрации заряженных частиц лучше 0,999995;

- конвертер-трекер с высоким координатным разрешением, который позволяет определять угловое направление регистрируемых гамма-квантов с точностью $\sim 0,01$ градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- времяпролетную сцинтилляционную систему, позволяющую выделять направление регистрируемых гамма-квантов с временным разрешением лучше 0,3 нс;

- калориметр с большой толщиной 25 р.е.д. из сцинтилляционных кристаллов, позволяющие регистрировать гамма-кванты до нескольких ТэВ с высоким энергетическим разрешением $\sim 1\%$;

- детекторные системы для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающие при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ.

Гамма-телескоп ГАММА-400 имеет следующие уникальные характеристики:

- диапазон энергий от нескольких десятков МэВ до нескольких ТэВ;

- большую чувствительную площадь $\sim 1 \text{ м}^2$;

- высокое энергетическое разрешение $\sim 1\%$ при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- высокое угловое разрешение $\sim 0,01$ градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- эффективную систему отбора гамма-квантов при значительном фоне заряженных частиц космических лучей;

- эффективную систему режекции «обратного тока».

Уникальные характеристики ГАММА-400 (при $E_\gamma = 100$ ГэВ угловое и энергетическое разрешения $\sim 0,01^\circ$ и $\sim 1\%$, соответственно) в 5-10 раз превосходят характеристики космического гамма-телескопа Fermi-LAT и существующих наземных гамма-телескопов H.E.S.S., MAGIC, VERITAS, HAWC, а также проектируемого СТА. При непрерывном длительном (до

100 суток) наблюдении областей небесной сферы, например, центра Галактики, пузырей Ферми и др., позволят гамма-телескопу ГАММА-400, имеющему поле зрения $\pm 45^\circ$, значительно продвинуться в проведении прецизионного исследования дискретных источников гамма-излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного гамма-излучения, выделения потоков гамма-излучения и электрон-позитронной компоненты космических лучей, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи.

На космической обсерватории наряду с гамма-телескопом устанавливается рентгеновский телескоп. Одновременные наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах центра Галактики, пузырей Ферми и т.п. значительно улучшат наше понимание процессов, происходящих в астрофизических объектах.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

1. Проведенный анализ современного состояния исследования дискретных источников, диффузного излучения и природы темной материи методами высокоэнергичной гамма-астрономии как в космических ($E_\gamma = \sim 100 \text{ МэВ} - \gtrsim 300 \text{ ГэВ}$), так и в наземных ($E_\gamma \gtrsim 100 \text{ ГэВ}$) экспериментах показал необходимость:

- непрерывных длительных измерений для получения хорошей статистики и изучения переменности астрофизических объектов;

- повторных измерений в связи с переменностью многих астрофизических объектов;

- расширения энергетического диапазона в сторону больших энергий (до нескольких ТэВ) для исследования пограничного диапазона энергий между космическими и наземными гамма-телескопами (в районе 100 ГэВ);

- улучшения энергетического разрешения научной аппаратуры для повышения точности измерений и разрешения гамма-линий при аннигиляции или распаде частиц «темной материи»;

- улучшения углового разрешения научной аппаратуры для идентификации астрофизических объектов и изучения структуры протяженных источников;

- создания гамма-телескопа нового поколения с большой площадью и улучшенными угловым и энергетическим разрешениями.

2. Проведенный анализ существующих методов регистрации гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий на космических аппаратах и требований к научной аппаратуре показал, что для решения актуальных астрофизических задач методами высокоэнергичной гамма-астрономии необходима научная аппаратура нового поколения, которая должна иметь:

- большую чувствительную площадь $\sim 1 \text{ м}^2$;
- широкий энергетический диапазон от $\sim 100 \text{ МэВ}$ и до нескольких ТэВ;
- высокое энергетическое разрешение $< 2\%$ при энергии гамма-квантов 100 ГэВ ;

- высокое угловое разрешение $< 0,05$ градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ ;

- эффективную систему выделения гамма-квантов на фоне заряженных частиц;

- эффективную систему исключения из регистрации частиц «обратного тока»;

- возможность одновременно с наблюдением гамма-излучения регистрировать электроны и позитроны космического излучения.

3. По результатам разработки новых методов, создания и проведения наблюдений на гамма-телескопе ГАММА-1, разработан гамма-телескоп ГАММА-400, в котором реализованы новые методы создания научной аппаратуры для проведения астрофизических исследований в диапазоне высоких ($E_\gamma \gtrsim 100 \text{ МэВ}$) и сверхвысоких ($E_\gamma \gtrsim 100 \text{ ГэВ}$) энергий с уникальными характеристиками, превышающими характеристики космических и наземных гамма-телескопов в 5-10 раз и который обладает:

- высокочувствительной координатной системой, позволяющей регистрировать гамма-кванты с высокой точностью и получать угловое разрешение $\sim 0,01$ градуса при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- высокоэффективным координатно-чувствительным калориметром, позволяющим регистрировать гамма-кванты в диапазоне от ~ 100 МэВ до ~ 1000 ГэВ с энергетическим разрешением $\sim 1\%$ при энергии гамма-квантов 100 ГэВ;

- высокоэффективными антисовпадательной и времяпролетной системами, способными выделять гамма-кванты на фоне заряженных частиц;

- высокоэффективной системой для исключения из регистрации частиц «обратного тока», возникающих при взаимодействии регистрируемых частиц с веществом калориметра при энергиях более 10 ГэВ;

- высокоэффективной системой режекции протонов при одновременной регистрации с гамма-квантами электронов + позитронов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. М. Авиньон, А. Гальпер, **Н. Топчиев** и др. Телескоп ГАММА-1 для гамма-астрономических наблюдений в области энергий 50-5000 МэВ. *Астрономический журнал*, 1986, т. 63, №5, с. 856-866.
2. **Н.П. Топчиев**, А.М. Гальпер, В. Бонвичини и др. Эксперимент «ГАММА-400»: состояние и перспективы. *Известия РАН (сер. физ.)*, 2015, т. 79, №3, с. 454–457.
3. V. Akimov, **N. Topchiev**, A. Galper, et al. The gamma-ray telescope GAMMA-1, *Space Science Reviews*, 1988, v. 49, no. 1-2, pp. 111-124.
4. V. Akimov, A. Galper, **N. Topchiev**, et al. Determination of the characteristics of the gamma-ray telescope GAMMA-1, *Space Science Reviews*, 1988, v. 49, no. 1-2, pp. 125-138.
5. V. Akimov, A. Galper, **N. Topchiev**, et al. Performance of GAMMA-1 telescope in flight: in Proc. 22nd International Cosmic Ray Conference, Dublin, 1991, v. 2, pp. 483-486.

6. С. Воронов, А. Гальпер, **Н. Топчиев** и др. Исследование и поиск гамма-пульсаров на обсерватории ГАММА-1. Известия Академии наук (сер. физ.), 1993, т. 57, №4, с. 152-157.
7. В. Акимов, А. Гальпер, **Н. Топчиев** и др. Наблюдение пульсара PSR 0833-45 телескопом ГАММА-1, Письма в Астрономический журнал, 1991, т. 17, №6, с. 501-504.
8. V. Akimov, A. Galper, **N. Topchiev**, et al. Analysis of the temporal behavior of the Vela pulsar with the high-energy telescope GAMMA-1: in Proc. 22nd International Cosmic Ray Conference, Dublin, 1991, v. 1, pp. 153-156.
9. В. Акимов, А. Гальпер, **Н. Топчиев** и др. Особенности фазовой кривой светимости гамма-пульсара PSR 0833-45 по данным наблюдений телескопом ГАММА-1. Письма в Астрономический журнал, 1992, т. 18, №4, с. 315-321.
10. J. Olive, **N. Topchiev**, A. Galper, et al. Observation of the Vela gamma-ray pulsar with the GAMMA-1 telescope. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1993, v. 97, no. 1, pp. 325-327.
11. V.V. Akimov, A.M. Galper, **N.P. Topchiev**, et al. Time variations of high-energy gamma-emission of Vela pulsar observed by GAMMA-1 telescope. Advances in Space Research, 1993, v. 13, no. 12, pp. 657-664.
12. V.V. Akimov, A.M. Galper, **N.P. Topchiev**, et al. Geminga pulsar observations with gamma-telescope GAMMA-1. Advances in Space Research, 1993, v. 13, no. 12, pp. 739-742.
13. В. Акимов, А. Гальпер, **Н. Топчиев** и др. Кривая светимости гамма-пульсара Геминга на энергиях 400-4000 МэВ по данным телескопа ГАММА-1. Письма в Астрономический журнал, 1993, т. 19, №7, с. 579-582.
14. E. Chuikin, A. Galper, **N. Topchiev**, et al. Observation of high-energy gamma-radiation from the binary system Hercules X-1/HZ Hercules with

- GAMMA-1 telescope: in Proc. 23rd International Cosmic Ray Conference, Calgary, 1993, v. 1, pp. 184-187.
- 15.V. Akimov, A. Galper, **N. Topchiev**, et al. Observation of high energy gamma-rays from the Sun with GAMMA-1 telescope ($E > 30$ MeV): in Proc. 22nd International Cosmic Ray Conference, Dublin, 1991, v. 3, pp. 73-76.
- 16.В. Акимов, А. Гальпер, **Н. Топчиев** и др. Регистрация гамма-лучей высоких энергий телескопом ГАММА-1 при солнечных вспышках 26 марта и 15 июня 1991 г. Письма в Астрономический журнал, 1992, т. 18, №2, с. 167-172.
- 17.N. Leikov, A. Galper, **N. Topchiev**, et al. Spectral characteristics of high-energy gamma-ray solar flares. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1993, v. 97, no. 1, pp. 345-348.
- 18.A.R. Bazer-Bachi, A.M. Galper, **N.P. Topchiev**, et al. High-energy gamma rays from the Sun as seen by the Gamma-1 telescope. Nuclear Physics B Supplements, 1993, v. 33AB, no. 1-2, pp. 208-212.
- 19.А. Гальпер, В. Земсков, **Н. Топчиев** и др. Временная структура гамма-излучения солнечной вспышки 26 марта 1991 г. Известия Академии наук (сер. физ.), 1993, т. 57, №7, с. 132-134.
- 20.N.G. Leikov, A.M. Galper, **N.P. Topchiev**, et al. Energy spectra of solar flare gamma-ray emission in the range 0.03-2 GeV registered by Gamma-1 telescope. Advances in Space Research, 1993, v. 13, no. 9, pp. 249-253.
21. А. Бененсон, Л. Курносова, М. Русакович, **Н. Топчиев**, М. Фрадкин. Газовый черенковский счетчик большой площади для исследования космического излучения. Приборы и техника эксперимента, 1986, №4, с. 45-48.
- 22.V. Dogiel, M. Fradkin, L. Kurnosova, L. Razorenov, M. Rusakovich, **N. Topchiev**. Some tasks of observational gamma-ray astronomy in the energy range 5-400 GeV. Space Science Reviews, 1988, v. 49, pp. 215-226.

23. M.I. Fradkin, V.L. Ginzburg, L.V. Kurnosova, **N.P. Topchiev**, et al. Some problems of the detection of high-energy gamma-radiation in space. *Advances in Space Research*, 1995, v. 15, no. 5, pp. 93-94.
24. M.I. Fradkin, V.L. Ginzburg, L.V. Kurnosova, **N.P. Topchiev**, et al. Gamma-radiation of the high energy and GAMMA-400 project: in Proc. 24th International Cosmic Ray Conference, v. 3, pp. 705-708, 1995.
25. В.Л. Гинзбург, Л.В. Курносова, **Н.П. Топчиев** и др. К вопросу о роли альbedo из калориметра телескопа «ГАММА-400» при регистрации первичного гамма-излучения: *Известия Академии наук (сер. физ.)*, 1997, т. 61, №3, с. 613-615.
26. В. Гинзбург, Л. Курносова, **Н. Топчиев** и др. Российский вариант телескопа для регистрации диффузного гамма-излучения в области энергий 10-1000 ГэВ: *Известия Академии наук (сер. физ.)*, 2005, т. 69, №3, с. 428-430.
27. В.Л. Гинзбург, Л.В. Курносова, **Н.П. Топчиев**, и др. Разработка гамма-телескопа ГАММА-400 для регистрации космического гамма-излучения с энергиями до 1 ТэВ. *Космические исследования*, 2007, т. 45, №5, с. 475-477.
28. В.Л. Гинзбург, **Н.П. Топчиев**, М.И. Фрадкин и др. Модернизированный гамма-телескоп ГАММА-400 для регистрации космического гамма-излучения с энергиями до 3 ТэВ. *Известия РАН (сер. физ.)*, 2009, т. 73, №5, с. 703-705.
29. А.М. Гальпер, **Н.П. Топчиев**, Р.Л. Аптекарь и др. Научные задачи и современное состояние проекта ГАММА-400. *Известия РАН (сер. физ.)*, 2011, т. 75, №6, с. 926-928.
30. A.M. Galper, R.L. Aptekar, **N.P. Topchiev**, et al. The possibilities of simultaneous detection of gamma rays, cosmic-ray electrons and positrons on the GAMMA-400 space observatory. *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 2011, v. 7, pp. 75-78.

31. A.M. Galper, R.L. Aptekar, **N.P. Topchiev**, et al. GAMMA-400 space observatory. *Il Nuovo Cimento*, 2011, v. 34C, no. 3, pp. 71-75.
32. А.М. Гальпер, С.В. Борисов, **Н.П. Топчиев** и др. Метод восстановления направления прилета гамма-квантов в системе конвертер и калориметр. *Краткие сообщения по физике, ФИАН*, 2011, №7, с. 14-23.
33. A.M. Galper, O. Adriani, **N.P. Topchiev**, et al. Status of the GAMMA-400 project. *Advances in Space Research*, v. 51, no. 2, pp. 297-300(2013).
34. A.M. Galper, O. Adriani, **N.P. Topchiev**, et al. Design and performance of the GAMMA-400 gamma-ray telescope for the dark matter searches. *AIP Conf. Proc.*, v. 1516, pp. 288-292, 2013.
35. E. Mocchiutti, A.M. Galper, **N.P. Topchiev**, et al. The GAMMA-400 space experiment: gammas, electrons and nuclei measurements, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, v. 239–240, pp. 204–209, 2013.
36. А.М. Гальпер, О. Адриани, **Н.П. Топчиев** и др. Характеристики гамма-телескопа ГАММА-400 для поиска следов темной материи. *Известия РАН (сер. физ.)*, 2013, т. 77, №11, с. 1605–1608.