

На правах рукописи

УДК 524.8; 520.6; 520.2

Буренин Родион Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ
ПО ДАННЫМ ТЕЛЕСКОПА СИГМА ОБСЕРВАТОРИИ
ГРАНАТ. ПОИСК ДАЛЕКИХ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК.**

01.03.02 Астрофизика, радиоастрономия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2000

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН

Научный руководитель – доктор физико-математических наук
Терехов Олег Викторович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Гнедин Юрий Николаевич

доктор физико-математических наук
профессор

Постнов Константин Александрович

Ведущая организация:
Московский инженерно-физический институт

Защита диссертации состоится 27 октября 2000 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 002.94.01 в Институте космических исследований РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 26 сентября 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.94.01
кандидат технических наук

В. Е. Нестеров

1 Общая характеристика работы

Актуальность темы

Космические гамма-всплески были открыты в начале 70-х годов при помощи детекторов, установленных на американских спутниках серии Vela. Они представляют собой кратковременные и яркие вспышки гамма-излучения, имеющие сложную временную структуру и нетепловой спектр. Несмотря на большие усилия, затраченные на наблюдения этого явления, более 20 лет его природа оставалась совершенно загадочной. Не был известен даже масштаб расстояний до их источников.

Положение дел изменилось коренным образом, когда с совершенствованием техники наблюдений были открыты послесвечения гамма-всплесков в рентгеновском, оптическом и радио диапазонах на временных масштабах от дней до месяцев и больше. При помощи оптических наблюдений было установлено, что источники существенной части гамма-всплесков находятся на космологических расстояниях, соответствующих красным смещениям $z \sim 1$. При этом только в виде гамма-квантов выделяется энергия $10^{52} - 3 \cdot 10^{54}$ эрг в случае, если источник излучает изотропно, что уже может быть больше $M_{\odot}c^2$.

Чтобы объяснить такое огромное энерговыделение и нетепловые спектры гамма-всплесков с большим количеством жестких фотонов $h\nu > 511$ кэВ, рассматриваются модели, в которых излучающая оболочка движется в направлении на наблюдателя с релятивистской скоростью. Наиболее популярной в настоящее время является модель релятивистского огненного шара, в которой гамма-кванты генерируются посредством синхротронного излучения. Эта модель успешно объясняет степенные кривые блеска и спектры послесвечений гамма-всплесков, наблюдаемых в рентгеновском и оптическом диапазонах. Для проверки этой модели и для ограничения ее параметров требуются дальнейшие наблюдения. Особый интерес представляют наблюдения послесвечений всплесков на ранней стадии, сразу после основного события, когда скорость релятивистского потока и температура вещества максимальны. В частности, такие наблюдения дают возможность оценить начальный гамма-фактор потока, чего нельзя сделать при наблюдениях послесвечения через большой промежуток време-

ни после всплеска. Этим определяется важность наблюдений космических гамма-всплесков и их послесвечений на ранней стадии.

Ценность наблюдений космологических гамма-всплесков не ограничивается изучением вещества в экстремальных условиях. Источники этих всплесков являются однородной выборкой объектов, расположенных на больших красных смещениях $z \sim 1$ и выше. Из известных астрофизических объектов на таких больших расстояниях находятся только квазары. Поэтому изучение космологических гамма-всплесков даст возможность оценить космологические параметры Ω и Λ и исследовать структуру вселенной на очень больших масштабах.

Одним из наиболее интересных с точки зрения космологии классов объектов являются скопления галактик. Они представляют собой самые большие гравитационно связанные объекты во Вселенной. Поскольку скопления образовались сравнительно недавно, их функция масс и ее эволюция во времени сильно зависят от космологических параметров Ω и Λ , а также от спектра начальных возмущений плотности. Поэтому наблюдения скоплений дают богатый материал для разнообразных космологических исследований.

Для исследований эволюции скоплений прежде всего необходимы полные и однородные выборки скоплений, которые были бы пригодны для статистического анализа. Существующие обзоры далеких скоплений плохо подходят для исследования эволюции скоплений большой рентгеновской светимости, так как они либо покрывают недостаточно большие площади небесной сферы и поэтому дают малые по объему выборки, либо имеют слишком низкую чувствительность и не содержат большого количества далеких скоплений. Поэтому получение и исследование большой однородной выборки ярких и далеких рентгеновских скоплений, пригодной для изучения эволюции скоплений большой рентгеновской светимости, представляет собой важную задачу.

Цель работы

Цель работы заключалась в подробном исследовании космических гамма-всплесков по данным телескопа СИГМА обсерватории ГРАНАТ. В частности, целью являлось составление каталога всплесков, зарегистрированных основным детектором и антисовпадательной защитой телескопа СИГМА. Благодаря тому, что обсерватория ГРАНАТ ра-

ботала на высокоапогейной орбите, фон на детекторе телескопа СИГМА во время наблюдений оставался в высокой степени стабильным, что является одним из основных преимуществ этого инструмента. Поэтому одной из главных задач являлось исследование излучения источников гамма-всплесков на больших временных масштабах.

Одной из основных целей работы было получение большой однородной выборки рентгеновских скоплений галактик, которая была бы пригодна для изучения эволюции скоплений большой рентгеновской светимости, измерение рентгеновских характеристик скоплений а также исследование распределений скоплений по потокам и радиусам при помощи полученной выборки.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми.

Впервые удалось наблюдать послесвечение гамма-всплеска в мягком гамма-диапазоне, поток в котором падает по степенному закону сразу после основного события. На основе этого наблюдения, в рамках модели релятивистского огненного шара, получена независимая оценка начального гамма-фактора релятивистского потока. По данным телескопа СИГМА показано, что мягкое гамма-излучение на временном масштабе ~ 1000 с вероятно присутствует после значительного числа гамма-всплесков. При исследовании долговременного излучения коротких гамма-всплесков установлены ограничения на параметры модели огненного шара для этих всплесков.

В работе получена самая большая на сегодняшний день однородная выборка рентгеновских скоплений галактик. При помощи моделирования методом Монте-Карло откалибрована процедура регистрации и измерения рентгеновских характеристик скоплений и вычислена площадь обзора. При исследовании этой выборки уточнена кривая подсчетов скоплений и напрямую показано, что распределение радиусов скоплений не эволюционирует между $z = 0,5$ и 0.

Практическая ценность работы

Данные наблюдений излучения источников гамма-всплесков на больших временных масштабах могут быть использованы для сравне-

ния с различными теоретическими моделями источников всплесков. Например, высокое значение начального гамма-фактора, которое следует из наблюдения раннего послесвечения всплеска 920723 в рамках модели релятивистского огненного шара, согласуется с такими значениями этой величины, которые необходимы для объяснения быстрой переменности и нетепловых спектров всплесков.

Полученные данные о кривой подсчетов и эволюции радиусов скоплений могут быть использованы для различных космологических исследований. Дальнейшее исследование полученной выборки скоплений даст возможность гораздо лучше изучить эволюцию различных характеристик скоплений галактик большой светимости. Это, в свою очередь, позволит установить ограничения на космологические параметры Ω и Λ .

Апробация работы

Отдельные результаты, представленные в диссертации, докладывались на семинарах ИКИ РАН, Астрофизического института Общества им. М. Планка (Германия), коллоквиуме ГАИШ (Москва, 1998), научной сессии МИФИ-99, конференциях "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era" (Рим, 1998), «Астрофизика на рубеже веков» (Пушино, 1999), «Золотовские чтения» (Владивосток, 1998, 1999), JENAM-2000 (Москва, 2000), "The Ninth Marcel Grossmann Meeting" (Рим, 2000), были включены в отчет о деятельности РАН за 1999 г.

Основные результаты диссертации опубликованы в шести научных работах в 1999–2000 гг.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения и трех частей. Каждая часть имеет список литературы. Объем диссертации — 100 страниц.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Проведен анализ данных телескопа СИГМА обсерватории ГРАНАТ с целью поиска космических гамма-всплесков. Проведена клас-

сификация событий, зарегистрированных основным детектором телескопа и его антисовпадательной защитой. Построены кривые блеска, измерены потоки и длительности зарегистрированных гамма-всплесков.

2. Обнаружено и исследовано раннее послесвечение самого яркого гамма-всплеска, зарегистрированного телескопом СИГМА (920723) на временном масштабе 1000 с. Измерен степенной наклон кривой блеска, исследована спектральная история послесвечения. Показано, что наблюдения согласуются с моделью релятивистского огненного шара, возникающего в источнике всплеска. Ранний максимум послесвечения свидетельствует о высоком начальном гамма-факторе потока.

3. Проведен поиск ранних послесвечений других гамма-всплесков, зарегистрированных телескопом СИГМА. Показано, что мягкое гамма-излучение на временном масштабе до ~ 1000 с вероятно присутствует после значительного числа гамма-всплесков.

4. Исследовано излучение коротких ($\Delta T < 1$ с) гамма-всплесков на временном масштабе $t \approx 30$ с по данным прибора БАТСЕ орбитальной обсерватории им. Комптона. Проведен анализ данных наблюдений в сравнении с моделью релятивистского огненного шара.

5. Проведен поиск далеких скоплений галактик по рентгеновским изображениям, полученным при помощи рентгеновского телескопа РОСАТ. Проведено моделирование процедуры регистрации и измерения рентгеновских характеристик скоплений. Проведена оптическая идентификация кандидатных объектов, измерены потоки излучения и радиусы скоплений.

6. На основе этих данных уточнена кривая подсчетов скоплений и исследована эволюция их рентгеновских радиусов. Непосредственно показано, что распределение радиусов скоплений не эволюционирует между $z = 0,5$ и 0.

2 Содержание работы

Первая часть диссертации посвящена описанию наблюдений космических гамма-всплесков телескопом СИГМА обсерватории ГРАНАТ и состоит из трех глав.

Первая глава содержит описание телескопа СИГМА. Основное

внимание при этом уделено тем особенностям инструмента, которые важны для наблюдений гамма-всплесков. В частности, описанию «вторичной оптики» телескопа и детекторов антисовпадатальной защиты.

Во *второй главе* представлены результаты наблюдений космических гамма-всплесков при помощи основного детектора телескопа СИГМА. Представлены данные всего периода наблюдений: с января 1990 г. по сентябрь 1998 г. Основная часть наблюдений приходится на 1990–1994 гг, так как после этого обсерватория ГРАНАТ большую часть времени проводила в «режиме сканирования», в котором наблюдения космических гамма-всплесков телескопом СИГМА были затруднены. Полное время наблюдений составило около 1,5 года. За все время наблюдений было зарегистрировано более 350 срабатываний всплесковой ячейки основного детектора. Из них 36 были вызваны космическими гамма-всплесками. Представлены каталог этих всплесков, их временные истории и распределения по потокам и длительностям. Телескопом СИГМА регистрировались относительно яркие всплески, с потоками в максимуме $10^{-6} - 10^{-4}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в диапазоне 35–1300 кэВ.

Третья глава посвящена наблюдениям космических гамма-всплесков при помощи антисовпадатальной защиты основного детектора телескопа СИГМА. Несмотря на очень большую геометрическую площадь, чувствительность антисовпадатальной защиты в качестве детектора гамма-всплесков оказывается низкой. В данных антисовпадатальной защиты среди более чем 700 срабатываний всплесковой ячейки было идентифицировано лишь 23 космических гамма-всплеска.

Вторая часть диссертации состоит из двух глав и посвящена наблюдениям послесвечений гамма-всплесков на ранней стадии их развития.

В *четвертой главе* представлены результаты исследований долговременного излучения источников гамма-всплесков на временном масштабе ~ 1000 с. Используя одно из основных преимуществ телескопа СИГМА — стабильный фон, удалось провести наблюдение раннего послесвечения яркого всплеска 920723, оказавшегося в поле зрения вторичной оптики телескопа. После всплеска, длившегося около 6 с, на протяжении ~ 1000 с наблюдалось затухающее мягкое гамма-излучение в диапазоне 35–300 кэВ. За это время высветилось $\sim 20\%$ энергии всплеска. Кривая блеска основного события плавно переходит

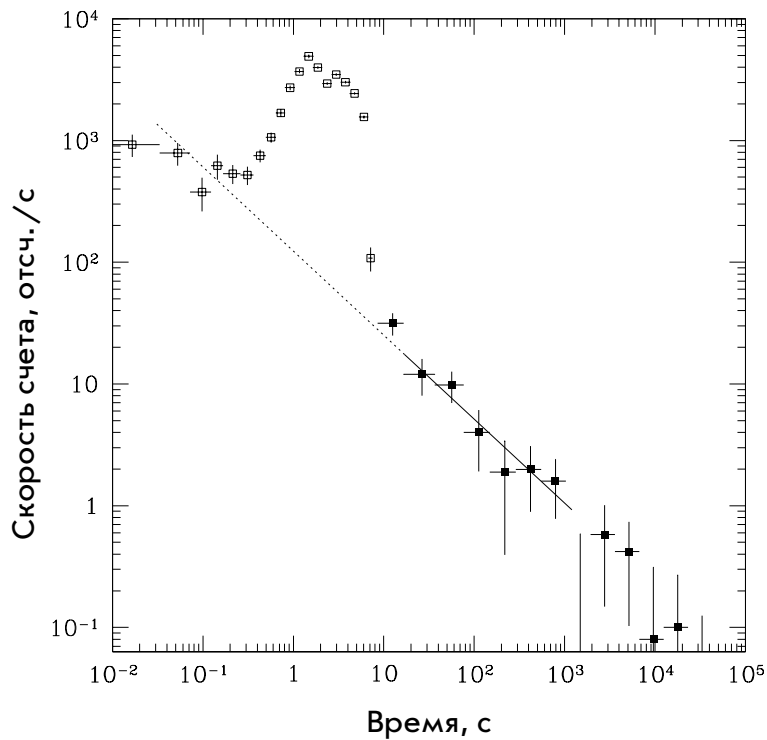


Рис. 1: Скорость счета после яркого всплеска 920723 с вычтенным фоном в логарифмических координатах. Нуль времени соответствует времени срабатывания всплесковой ячейки.

в послесвечение, в котором поток спадает по степенному закону с показателем $-0,7$ (рис. 1). В момент начала падения потока всплеска наблюдается резкое изменение жесткости излучения. Таким образом, процесс, ответственный за послесвечение всплеска, начинается сразу после или во время основного события. Резкое изменение спектральных характеристик может указывать на момент времени, когда заканчивается процесс, в котором рождается большая часть жесткого и переменного излучения основного всплеска.

В рамках модели релятивистского огненного шара ранний максимум послесвечения в мягком гамма-диапазоне ($t_\gamma \approx 6$ с) свидетельствует о высоком начальном гамма-факторе релятивистского потока

$$\gamma_0 \gtrsim 280(E/10^{52} \text{ эрг})^{1/8}(n/1 \text{ см}^{-3})^{-1/8},$$

где E — начальная кинетическая энергия оболочки, а n — плотность межзвездной среды, окружающей источник. Эта оценка нижней границы начального гамма-фактора оболочки хорошо согласуется с независимой оценкой этой величины, которая получается из необходимости объяснить быструю переменность излучения всплесков и их не-тепловые спектры.

Подробно проанализированы данные телескопа СИГМА с целью поиска ранних послесвечений других всплесков, зарегистрированных

этим прибором. Подобных послесвечений других всплесков не обнаружено, что можно было бы объяснить их относительной слабостью. Однако средний по всем слабым всплескам поток во временном интервале 100–800 с оказывается отличным от нуля на уровне значимости больше 95%. Это свидетельствует о том, что мягкое гамма-излучение на временном масштабе 1000 с вероятно присутствует после существенной части гамма-всплесков.

В пятой главе исследуется излучение коротких ($\Delta T < 1$ с) гамма-всплесков на временном масштабе до $t \approx 30$ с по данным прибора BATSE (BATSE) на борту орбитальной обсерватории им. Комптона (CGRO). Этот инструмент плохо подходит для изучения долговременного слабого излучения всплесков на временных масштабах $\gtrsim 100$ с из-за существенной переменности фона. Значимый поток на временном масштабе 10 – 30 с регистрируется для $\sim 20\%$ коротких всплесков. Наблюдаемое долговременное излучение в большинстве случаев может быть объяснено в рамках модели релятивистского огненного шара как раннее послесвечение всплеска. Для остальных всплесков из ограничения на поток в максимуме послесвечения установлены ограничения на параметры модели.

Третья часть диссертации посвящена поиску далеких скоплений галактик по данным спутника ROSAT.

Описывается новый обзор ярких рентгеновских скоплений галактик, обнаруженных в 1490 высокоширотных наведениях телескопа ROSAT. Скопления регистрировались как протяженные источники при помощи специально адаптированной процедуры. Процедура регистрации скоплений и измерения их рентгеновских характеристик была откалибрована при помощи большого объема моделирований методом Монте-Карло. Вычислена вероятность регистрации скопления в обзоре в зависимости от потока. Показано, что оценки потоков скоплений и их радиусов получаются несмещенными. Кроме того, моделирования позволяют точно определить ошибки измерения этих величин.

Обзор нацелен на создание выборки, пригодной для изучения эволюции скоплений галактик большой рентгеновской светимости и поэтому ограничен скоплениями с потоком больше 10^{-13} эрг с^{-1} см^{-2} . Площадь обзора составила 360 кв. градусов ($\sim 1\%$ всего неба) для ярких скоплений и падает менее чем в два раза на предельном потоке 10^{-13} эрг с^{-1} см^{-2} . Площадь нашего обзора в сравнении с площадью

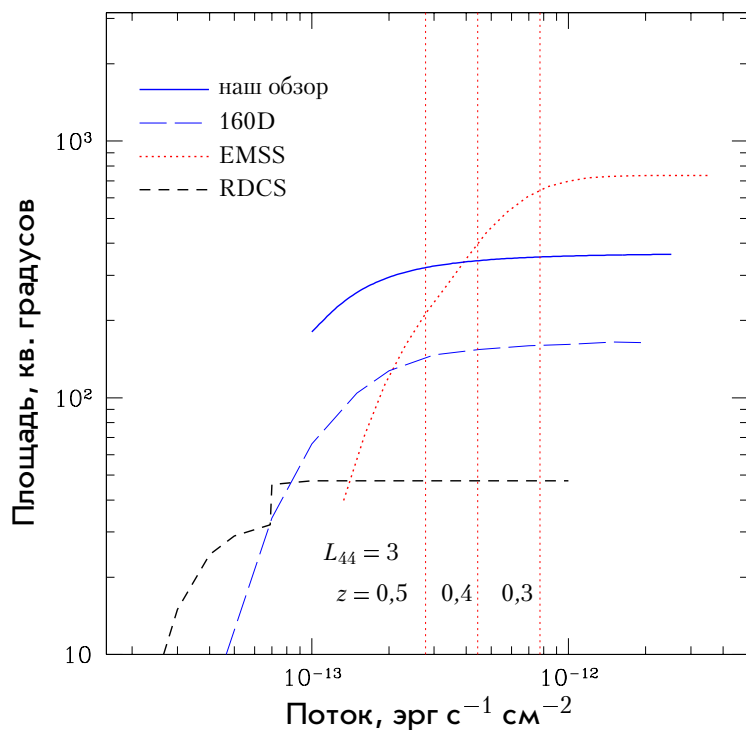


Рис. 2: Площадь обзора в сравнении с площадями других обзоров: 160D (Вихлинин и др., 1998); Обзор средней чувствительности обсерватории им. Эйнштейна (EMSS, Джойя и др., 1990; Стоук и др., 1991); RDCS (Росати и др., 1998). Вертикальными пунктирными линиями указано, какой поток имело бы скопление со светимостью $L_{44} = 3$, расположенное на красных смещениях $z = 0,3, 0,4$ и $0,5$.

других обзоров показана на рис. 2. Видно, что она существенно превышает площади других обзоров именно в том интервале потоков, который наиболее интересен для изучения эволюции скоплений большой светимости.

В обзоре зарегистрировано 367 протяженных источников с потоком больше установленного предела, из которых 279 были идентифицированы как скопления галактик с использованием оцифрованных фотографических пластинок Паломарского обзора, а также других каталогов скоплений галактик. Большинство оставшихся источников, вероятно, являются скоплениями, расположенными на $z > 0,5$, для которых чувствительность фотопластинок недостаточна для оптической идентификации. В результате получена самая большая на сегодняшний день рентгеновская выборка скоплений галактик.

Приведена кривая подсчетов скоплений, исправленная на уменьшение площади обзора при низких потоках. Она в общих чертах согласуется с данными других обзоров меньшей площади как при больших, так и при малых потоках скоплений. Представлены результаты, касающиеся эволюции их радиусов. Непосредственно показано, что распределение радиусов скоплений не эволюционирует между $z = 0,5$ и 0. Автомодельная эволюция плохо описывает экспериментальные данные при $\Omega_m \gtrsim 0,1$. Это свидетельствует о важности учета влияния не-

гравитационных процессов на структуру горячего газа скоплений.

Основные выводы и результаты диссертационной работы

1. Построены кривые блеска, измерены потоки и длительности гамма-всплесков, зарегистрированных телескопом СИГМА обсерватории ГРАНАТ.

2. Обнаружено и исследовано раннее послесвечение яркого гамма-всплеска 920723 на временном масштабе 1000 с, поток в котором падает по степенному закону сразу после основного события. Показано, что наблюдения согласуются с моделью релятивистского огненного шара, возникающего в источнике всплеска. Ранний максимум послесвечения свидетельствует о высоком начальном гамма-факторе потока.

3. Показано, что мягкое гамма-излучение на временном масштабе до ~ 1000 с вероятно присутствует после значительного числа гамма-всплесков.

4. Показано, что регистрируемое излучение коротких ($\Delta T < 1$ с) гамма-всплесков на временном масштабе $t \approx 30$ с может быть объяснено в рамках модели релятивистского огненного шара как раннее послесвечение всплеска. Установлены ограничения на параметры модели для тех коротких всплесков, после которых не регистрируется значимого потока на большом временном масштабе.

5. Получена самая большая на сегодняшний день однородная выборка рентгеновских скоплений галактик, пригодная для изучения эволюции скоплений большой рентгеновской светимости.

6. При исследовании этой выборки уточнена кривая подсчетов скоплений и исследована эволюция их рентгеновских радиусов. Непосредственно показано, что распределение радиусов скоплений не эволюционирует между $z = 0,5$ и 0. Этот вывод не согласуется с предположением об автономной эволюции скоплений и свидетельствует о важности учета влияния негравитационных процессов на структуру горячего газа скоплений.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Burenin R. A.**, Vikhlinin A. A., Gilfanov M. R., Terekhov O. V., Tkachenko A. Yu., Sazonov S. Yu., Churazov E. M., Sunyaev R. A., Goldoni P., Claret A., Goldwurm A., Paul J., Roques J. P., Jourdain E., Pelaez F., Vedrenne G. GRANAT/SIGMA observation of the early afterglow from GRB 920723 in soft gamma-rays // *Astron. Astrophys. (Letters)*. 1999. V. 344. L53.
2. **Буренин Р. А.**, Вихлинин А. А., Терехов О. В., Ткаченко А. Ю., Сазонов С. Ю., Гильфанов М. Р., Чуразов Е. М., Сюняев Р. А., Голдони П., Кларе А., Голдвурм А., Поль Ж., Рок Ж.-П., Журден Е., Ведренн Г., Мандру П. Послесвечение гамма-всплеска 23-го июля 1992 г. по данным телескопа СИГМА обсерватории *Гранат* // *Письма в Астрон. журн.* 1999. Т. 25, С. 483.
3. **Burenin R. A.**, Vikhlinin A. A., Terekhov O. V., Tkachenko A. Yu., Sazonov S. Yu., Gilfanov M. R., Churazov E. M., Sunyaev R. A., Goldoni P., Claret A., Goldwurm A., Paul J., Roques J. P., Jourdain E., Vedrenne G., Mandrou P. GRANAT/SIGMA observation of GRB 920723 soft gamma-ray afterglow // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1999. V. 138, P. 443.
4. **Буренин Р. А.** Ранние послесвечения коротких гамма-всплесков // *Письма в Астрон. журн.* 2000. Т. 26, С. 323.
5. **Буренин Р. А.**, Терехов О. В., Сюняев Р. А., Дьячков А. В., Хавенсон Н. Г., Новиков Б. С., Церенин И. Д., Суханов К. М., Голдони П., Кларе А., Голдвурм А., Поль Ж., Пелаез Ф., Журден Е., Рок Ж.-П., Ведренн Г. Наблюдения космических гамма-всплесков основным детектором телескопа СИГМА обсерватории *Гранат* // *Письма в Астрон. журн.* 2000. Т. 26, С. 483.
6. **Буренин Р. А.**, Вихлинин А. А. Новый обзор ярких рентгеновских скоплений галактик // *Препринт ИКИ. Пр-2029.* 2000. 25с.

055/02/2

Ротапринт ИКИ РАН
Москва, 117810, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 22.09.00

Заказ	Формат 70×108/32	Тираж 100	0,5 уч.-изд.л.
-------	------------------	-----------	----------------