

Астрономические исследования в Казахстане

Под общей редакцией

Доктора технических наук, профессора М.Р. Нургужина

Доктора физико-математических наук, профессора,
член-корреспондента НАН РК Ж.Ш. Жантаева

PhD, А.Ж. Бибосинова

Алматы 2020

УДК 52
ББК 22.6
К 14

Министерство цифрового развития, инноваций и
аэрокосмической промышленности Республики Казахстан
Аэрокосмический Комитет

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
ДТОО «АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. В.Г. ФЕСЕНКОВА»
(АФИФ)

Серия «Казахстанские Космические исследования»

Том 12

юбилейный выпуск к 70-летию АФИФ

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
(протокол № 3 от 27 марта 2020 года)

Ответственные редакторы:
кандидат физико-математических наук Ч.Т. Омаров
ученый секретарь Р.И. Кокумбаева

©АО «Национальный центр космических
исследований и технологий»
©ДТОО «АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ им. В.Г. ФЕСЕНКОВА»
©ТОО «А-ТРИ Принт», оформление, 2020

ISBN 978-601-332-805-8

Оглавление

Введение	6
Раздел 1. Мониторинг геостационарной области	11
1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ	11
2. МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЪЕКТОВ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОБЛАСТИ	16
2.1 Методика потокового анализа фотометрических наблюдений. <i>Серебрянский А., Айманова Г., Серебряков С., Ергешев А.</i>	16
2.2 Оптический комплекс на базе телескопа RC500 и EMCCD обсерватории Ассы-Тургень. <i>Серебрянский А., Кругов М., Личкановский Н., Комаров А., Усольцева Л., Акниязов Ч.</i>	30
3. О СИТУАЦИИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ОРБИТАХ И ВЕРОЯТНОСТИ ОПАСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ	39
3.1 Геостационарные спутники, потенциально опасные для казахстанских спутников связи KAZSAT 2 и KAZSAT 3. <i>Демченко Б., Воропаев В., Комаров А., Серебрянский А., Усольцева Л., Акниязов Ч.</i>	40
3.2 Статистический анализ взаимных сближений аппаратов геостационарной зоны. <i>Серебрянский А., Демченко Б., Акниязов Ч., Комаров А., Омаров Ч., Рева И., Кругов М., Воропаев В.</i>	49
4. ОЧИЩЕНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ОТ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА <i>Shambo Bhattacharjee, Shreyas Mirji, Manohar Karna, Chingiz Akniyazov, Jose Ferreira, Karthika R.R.</i>	74
Раздел 2. Мониторинг объектов в околоземном космическом пространстве	
1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ (ОСЗ) <i>Серебрянский А., Комаров А., Омаров Ч., Рева И., Кругов М., Кусакин А., Акниязов Ч.</i>	93
2. ОПТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ АППАРАТОВ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ <i>Серебрянский А., Рева И., Кругов М., Кусакин А., Воропаев В.</i>	113

Раздел 3. Исследования объектов дальнего космоса	130
1. ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙФЕРТОВСКИХ ГАЛАКТИК <i>Денисюк Э.К., Шомшиекова С.А., Валиуллин Р.Р., Рева И.В., Кругов М.А., Айманова Г.К.</i>	130
2. РЕНТГЕНОВСКИЕ ПУЛЬСАРЫ <i>Ким В.Ю.</i>	155
3. ДВОЙНЫЕ ЗВЁЗДНЫЕ СИСТЕМЫ <i>Мирошниченко А., <u>Куратов К.С.</u>, Наурзбаева А., Алимгазинова Н.</i>	182
4. ПЕРЕМЕННОСТЬ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ <i>Кондратьева Л., Денисюк Э., Айманова Г., Кругов М., Рева И., Кусакин А.</i>	207
5. КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКИ <i>Аймуратов Е.К.</i>	238
6. АБСОЛЮТНАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ В АСТРОФИЗИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМЕНИ В.Г. ФЕСЕНКОВА В ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ <i>Терещенко В.М.</i>	270
Раздел 4. Теоретическая и вычислительная астрофизика	302
1. РЕШЕНИЕ ВАЙДЫ КАК АРТЕФАКТ КООРДИНАТ КРИВИЗН <i>Мычелкин Э., Макуков М.</i>	302
2. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В АФИФ <i>Юрин Д.</i>	319
Раздел 5. Исследование Солнца и планет	333
1. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК <i>Минасянц Г., Минасянц Т., Томозов В.</i>	333
2. 50 ЛЕТ ЛАБОРАТОРИИ ФИЗИКИ ЛУНЫ И ПЛАНЕТ АФИФ <i>Вдовиченко В., Каримов А., Кириенко Г., Лысенко П., Тейфель В., Филиппов В., Харитонова Г., Хоженец А.</i>	343

КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКИ

Ерлан Кайратович Аймуратов (Yerlan Kairatovich Aimuratov)

АННОТАЦИЯ

В данной заметке даётся исторический обзор по гамма-всплескам, а также краткое изложение состояния исследований в Астрофизическом Институте имени В. Г. Фесенкова.

1. Введение
2. Методы
 - 2.1 Общие аспекты исследований
 - 2.2 Исследования индивидуальных всплесков
 - 2.3 Исследования популяций всплесков
3. Перспективы
 - 3.1 Исследования с помощью оптических телескопов института
 - 3.2 Перспективы исследований гамма-всплесков в Казахстане
 - 3.3 Общие перспективы

1. ВВЕДЕНИЕ

Гамма-всплески (ГВ) представляют собой класс астрофизических объектов далёкого космоса. Их природа малоизучена и на данный момент представляет интерес для целого ряда астрофизических областей. Одной из главных отличительных черт ГВ является их колоссальное энерговыделение.

Исследования гамма-всплесков в Астрофизическом Институте имени В. Г. Фесенкова начали проводиться относительно недавно. Тому есть несколько причин, так или иначе, связанных с техникой эксперимента, а также с природой этих загадочных объектов.

Несмотря на полувековую историю, данное явление всё ещё остаётся не до конца понятным. Для удобства дальнейшего повествования можно условно разделить изучение ГВ на два подхода—наблюдательный и теоретический.

В **наблюдательном** подходе важными свойствами ГВ являются их временные, пространственные и спектральные характеристики. Именно они будут определяющими для целей исследований в Астрофизическом Институте с точки зрения наблюдательной астрофизики, поэтому мы посвятим этому подходу больше внимания.

По **временным** свойствам ГВ являются быстротекущими процессами и представляют собой явления катастрофической природы с мощнейшим выделением энергии в очень малом интервале времени. Характерные оценки по времени приёма излучения [1] находятся в пределах от миллисекунд до нескольких сотен (очень редко тысяч) секунд в диапазоне энергий кэВ–МэВ.

Постепенное накопление наблюдательного материала позволило выявить два класса объектов [2], состоящих из коротких (<2 секунд) и длинных (>2 секунд) по продолжительности всплесков (кэВ–МэВ). Также в силу наблюдательных особенностей за продолжительность ГВ принято считать интервал времени, в течении которого было задетектировано 90% всего потока фотонов, то есть, когда кумулятивный поток от источника увеличивается с 5% до 95% выше уровня фонового излучения в диапазоне энергий 50–300 кэВ. Чем вызван выбор данного интервала энергий будет пояснено далее в тексте.

В среднем по два ГВ детектируются ежедневно, общее их число на данный момент превышает семь тысяч уникальных событий. Соответственно, принятая номенклатура [3] использует формат GRB YYMMDDX, где GRB—Gamma-Ray Burst, YY—год, MM—месяц, DD—день, X—буква английского алфавита, обозначающая порядковый номер для

событий одного дня (“А” для первого объявленного события, “В”—для второго, “С”—для третьего, и т.д.).

Морфология временных структур в виде кривых блеска позволяет сделать важный вывод о структурах самих всплесков и их окружающей среды, являясь прямым отражением происходящих там процессов. Так, считается, что самым простым (для целей последующей физической интерпретации) видом кривой является быстрый рост и затем медленный экспоненциальный спад (Fast Rise and Exponential Decay Pulse, FRED-pulse) [4]. Наиболее подходящая физическая модель для данного вида кривой предполагает свободное (баллистическое) расширение горячей и плотной плазмы с ультрарелятивистскими скоростями. Более сложные виды представляют собой бесструктурные пики разной интенсивности и продолжительности, а также их возможные наложения. Современные инструменты для ГВ позволяют работать с временным разрешением до 2 мкс, что позволяет детектировать практически каждый приходящий фотон. Тем не менее, установлено, что события очень различаются по формам кривой блеска и двух абсолютно одинаковых кривых не обнаружено, следовательно, нет и двух типичных временных профилей для гамма-всплесков.

Согласно делению общей продолжительности по временному признаку ГВ могут иметь фазы основного излучения (prompt) и послесвечения (afterglow). Если в первой из названных фаз энергия выделяется в диапазоне кэВ–МэВ и составляет большую часть принимаемой энергии, то в последней активность проявляется в диапазонах эВ–кэВ и МэВ–ГэВ и общий вклад в энергию меньше примерно на порядок по величине.

Среди нерегулярных особенностей временных профилей следует отметить элемент предшественника (precursor element), являющийся ничем иным как слабое превышение фона, происходящее незадолго (за десятки секунд) до основного всплеска [5]. К другим свойствам можно отнести асимметрию импульсов по времени [6], а также отражение спектральной изменчивости ГВ во временном профиле, так называемая “эволюция от жёсткого до мягкого спектра” (hard-to-soft spectral evolution) [7].

Действительно, отдельные эпизоды взрывной эволюции этих катастрофических гамма-всплесков должны быть скрыты во временном профиле многопиковой кривой, где каждый пик должен отражать элементарный акт излучения вещества. Последнее, в свою очередь, может быть интерпретировано широким кругом физических моделей разного уровня сложности.

К **пространственным** характеристикам ГВ можно отнести их положение на небесной сфере, а также саму дистанцию до этих объектов. Успехи в этих вопросах были тесным образом связаны с усовершенствованием наблюдательной техники, а для окончательного ответа потребовалось ни много ни мало тридцать лет.

Сейчас известно, что гамма-всплески наблюдаются во всём электромагнитном спектре с преимуществом в гамма диапазоне энергий кэВ–МэВ, отсюда и название объекта. Данная область относится к рентгеновской и гамма астрономии, которая отличается с экспериментальной точки зрения ввиду невозможности непосредственных наземных наблюдений [8,9]. Этот факт является отправным пунктом в кардинальном различии самой техники эксперимента и осуществлении наблюдений.

Рентгеновское и гамма излучение является ионизирующим и коротковолновым, означающее, что фотоны обладают высокопроницающей способностью. Детектируются они в процессе взаимодействия с веществом поглощающего материала—активной зоны детектора излучения; основными физическими процессами здесь являются фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и производство электрон-позитронных пар. Следует лишь отметить, что с развитием техники эксперимента, а также успехами в отрасли управляемых космических полётов, расширился и рабочий диапазон рентгеновских и гамма телескопов и на данный момент он составляет восемь порядков по величине энергии.

Изначально не было известно являются ли всплески объектами нашей галактики или всё же имеют внегалактическое происхождение. Ответ на этот простой вопрос влиял на оценку изотропной энергии, испускаемой за столь короткий промежуток времени.

В конструкции космических гамма телескопов используются несколько техник для локализации всплесков. Один из них основывается на измерениях относительных показателей интенсивности ортогонально-ориентированных детекторов на борту космической обсерватории [10]. Преимуществом описанного метода является локализация в широком поле зрения. Точность позиционирования зависит от общей стабилизации космического аппарата, надлежащем моделировании сигнала и фонового шума и может быть измерена в поле с точностью до нескольких квадратных градусов.

Другой техникой локализации является использование разницы времени прихода сигнала до двух далеко разделённых детекторов [11]. В астрономии такая практика носит название метода параллакса (или метода триангуляции). Критериями для увеличения точности позиционирования здесь являются увеличение расстояния между детекторами и более точная синхронизация часов. Результирующая ошибка измерения может достигать величины до нескольких квадратных угловых минут. Преимуществом данного метода является использование разных инструментов и миссий; самой успешной попыткой такого рода коллабораций можно считать Межпланетарную Сеть (InterPlanetary Network, IPN) [12,13].

Ещё одним методом позиционирования ГВ в инструментах рентгеновской и гамма астрономии является использование масок с кодирующей апертурой (coded-aperture mask). Интересным фактом является то, что данная техника была основана на принципиальном физическом ограничении, а именно невозможности сфокусировать фотоны высоких энергий с помощью линз и зеркал [14,15,16]. В методе используется решётка со специальным узором, установленная на самом детекторе таким образом, что падающее излучение создаёт уникальный рисунок тени на массиве приёмников, по которому возможно математически реконструировать назад положение источника на небе. К примеру, одна из используемых современных масок [17] имеет площадь $2,7 \text{ м}^2$ с полем зрения $1,4$ стерадиан и в течение первых 10 секунд способна вычислить положение с радиусом неопределённости в 4 угловые минуты.

Накопление небольшого, но достаточного наблюдательного материала позволило сделать первые попытки ответить на вопрос о расстоянии до объектов. Ранние работы [18,19,20,21] отмечают значительный разброс от плоскости галактики, тем самым, указывая на внегалактическое происхождение ГВ. К тому же, было замечено [19,22,23], что некоторое малое количество всплесков повторяются во времени. Конечно, с накоплением достаточной статистики (около 500 уникальных событий на начало последней декады XX века) стало возможно разделить всё множество два отдельных класса объектов [24]: классические всплески и источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (Soft Gamma Repeaters, SGR) [25,26,27]. Последние являются объектами, находящимися в нашей галактике и ассоциированы с магнетарами—сильно намагниченными нейтронными звёздами [28].

С введением в строй нового поколения космических гамма телескопов количество детектируемых ГВ выросло на порядок по величине. Равномерное распределение [29] всплесков по всей небесной сфере почти с абсолютной уверенностью указало на их космологическое происхождение [30,31,32,33,34]. Полную ясность внесло первое измерение красного смещения в спектре гамма-всплесков.

Впервые измеренное рентгеновское послесвечение от ГВ [35] имело сравнительно малую неопределённость в локализации (в пределах от угловых минут до угловых секунд). Небольшое поле позволило в скором времени навестись оптическим телескопам [36] и идентифицировать ранее не отождествлённый объект с быстро уменьшающимся блеском. В скором времени в спектре другого объекта [37,38] были получены слабые

линии поглощения родительской галактики [39], что позволило оценить дистанцию. Таким образом, было впервые измерено расстояние до ГВ.

Сегодня измеренные значения расстояний до сотен всплесков оценивают изотропно-эквивалентную энергию как величину, которая варьируется в пределах от 10^{46} до 10^{55} эрг, что делает космологические гамма-всплески самыми энергетическими объектами во Вселенной.

Спектральные свойства ГВ должны характеризовать качество и количество принимаемого излучения, то есть отвечать на следующие вопросы: сколько фотонов пришло за определённое количество времени с конкретного положения на небе и каково распределение по энергии принимаемой радиации?

Ранние работы [40] обнаружили, что спектр хорошо описывается экспоненциальными кривыми с максимум интенсивности около 150 кэВ. Каталог, основанный на большем количестве наблюдений [19,41,42], представил две группы спектров: в то время как первая группа спектров подчинялась степенному закону $dN \propto E^{-\alpha} dE$ с показателем степени в интервале $\alpha = 1,3 - 2,5$ с максимумом распределения в $1,5 - 1,7$ по индексу, то вторая более многочисленная группа хорошо описывалась формулой $dN/dE \propto \exp(-E/E_0)$, где $E_0 = 100 - 200$ кэВ, степенного закона с экспоненциальным обрезанием на высоких энергиях.

Вышеупомянутая эволюция спектров во времени также наблюдалась в подавляющем большинстве случаев, меняясь от максимума распределения в жёсткой области к смещению этого максимума в область мягкого гамма. Была отмечена слабая зависимость вида временного профиля от распределения в спектре. Другими вехами в наблюдении спектральных свойств были: общность и важность излучения выше 1 МэВ, изменчивость спектра на временных масштабах меньших, чем длительность самого всплеска [43], обнаружение синтетической спектральной модели [44], хорошо описывающей поведение спектра в гамма диапазоне, а также отсутствие стандартного набора параметров этой модели.

Указанный выше интервал для оценки продолжительности всплеска был выбран именно из-за особенности спектра, точнее из-за того, что пик спектрального распределения по энергии приходится на интервал между <100 кэВ и >1 МэВ, с преобладанием случаев с пиком <200 кэВ. Неожиданным было обнаружение высокоэнергетических фотонов с энергиями выше 1 ГэВ и интенсивностями того же (или на единицу меньше) порядка по величине [45], и не менее важным было и то, что излучение в высоких энергиях систематически запаздывает по сравнению с основным излучением и длится гораздо дольше по времени.

С наблюдательной точки зрения спектры ГВ характеризуются несколькими параметрами. Среди них: плотность потока частиц (photon flux, [photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]), плотность потока энергии (energy flux, [erg $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]), “флюенс” или поток энергии (energy fluence, erg cm^{-2}), спектральная жёсткость (spectral hardness). Эти величины определяют множество свойств и при известном значении красного смещения и полной продолжительности могут служить для вычисления излученной энергии. В современных каталогах [32,34,46,47,48] данные величины являются основными наблюдательными характеристиками спектра гамма-всплесков.

В целом известно, что ГВ обнаруживают себя во всем электромагнитном спектре: гамма фотоны сверхвысоких и высоких энергий (ТэВ–ГэВ, фаза послесвечения), жёсткие и мягкие гамма фотоны (МэВ–кэВ, фаза основного излучения), рентгеновские фотоны (кэВ–эВ, фаза послесвечения), ультрафиолетовая, оптическая и инфракрасная область (эВ, фаза послесвечения), радиоизлучение (фаза послесвечения). Помимо этого обнаружены неэлектромагнитные сигналы в виде гравитационных волн, а также ведётся поиск излучения нейтрино от гамма-всплесков.

Превалирующим типом всплесков является нетепловой спектр. Следовательно, поиск радиационных процессов должен быть осуществлён среди других (желательно

физических) моделей. Тем не менее, в некоторых событиях чернотельная компонента, всё же, вносит свой вклад [49,50], входя с небольшим содержанием в состав многокомпонентной модели.

Технически говоря, спектр ГВ в широком интервале длин волн может быть воспроизведён синтетически с помощью трёх компонент, а именно двумя нетепловыми и одной тепловой, где одна из нетепловых составляющих—обычно степенной закон (PL)—служит для продолжения распределения в область высоких энергий. Несовершенство этого подхода кроется в последующей физической интерпретации, в микро- и макрофизике явлений, которые давали бы в совокупности данное распределение.

Из вышесказанного ясно, что спектр ГВ должен излучаться оптически тонкой средой (optically thin emission), что является прямым следствием интерполяции моделью, описываемой нетепловым радиационным процессом. Отсылая читателя к специализированной литературе по данному вопросу [51], мы лишь отменим, что процессы, ответственные за проявление непрерывного спектра—тех процессов, с которыми мы имеем дело в рентгеновском и гамма диапазонах ГВ—являются следствием излучения плотной и горячей плазмы, свободной от каких-либо существенных вариативных ограничений по энергии. И указанное излучение оптически тонкой или, обратной ей, оптически толстой (optically thick emission) сред тесным образом соотносится с характеристиками излучающей плазмы, а именно с геометрическими (размеры и релятивистские эффекты) и композитными (частицы и фотоны различной энергии, их плотность и другие параметры) свойствами.

В завершении описания спектральных характеристик мы остановимся вкратце на других временных фазах излучения ГВ—рентгеновское, оптическое, радио послесвечения, а также фаза излучения фотонов высоких энергий—с перспективы спектральных свойств.

В настоящее время рентгеновское послесвечение (x-ray afterglow) гамма-всплесков наблюдается на постоянной основе и около 95% всех событий обнаруживают их присутствие. Каноническая структура кривой блеска в рентгеновском диапазоне спектра в общем случае состоит из трёх отчётливых сегментов степенного закона [52]; позже она была дополнена и на данный момент имеет пять компонент [53]: крутое убывание (steep decay), плато (plateau или shallow decay), вспышка (flare), умеренное убывание (normal decay) и позднее убывание (late decay). Характеристическое уравнение, описывающее поведение плотности потока излучения со временем выражается как $F_{\nu}(t, \nu) \propto t^{-\alpha} \nu^{-\beta}$, где показатели степени α и β обозначают, соответственно, временной индекс (temporal index) и спектральный индекс (spectral index). Тем самым, каждый эпизод рентгеновского послесвечения определяется интервалом значений этих индексов.

Множество работ посвящено исследованиям отдельных эпизодов канонической структуры рентгеновского послесвечения и интерпретационные сценарии используют различные виды механизмов и геометрий, но большинство сходятся во мнении, что доминирующим процессом является синхротронное излучение релятивистских электронов. Эти мнения во многом сходятся именно из-за типа кривой спектра, который наилучшим образом интерполируется степенным законом (PL) в однокомпонентных моделях различного рода. Также небольшую часть занимают работы по поиску тепловой компоненты в вспышках (flares), а также взаимосвязи компоненты позднего убывания (late decay) с оптическим послесвечением.

Около 70% всех ГВ обнаруживают оптическое/инфракрасное послесвечение наземными телескопами и обычно такая возможность появляется после получения координат места от узкопольного рентгеновского инструмента с задержкой по времени в несколько минут. Имеются также случаи [54,55], подтверждающие сосуществование оптического послесвечения (эВ) во время основного излучения (кэВ–МэВ) ввиду достаточной интенсивности первого. Такие наблюдения, всё же, редкие, и на практике следует ожидать, что успешность алертных наземных наблюдений зависит от многих

факторов, которые должны совпасть на случайный момент непредсказуемого события: ночное время суток, ясная безоблачная погода, доступность позиции относительно широты обсерватории, отсутствие ярких источников, таких как Луна, готовность самого инструмента и прочее.

Оптическое послесвечение можно условно разделить на “раннюю” и “позднюю” стадии. Они отличаются по временным и спектральным характеристикам, где ранняя более интенсивная фаза демонстрирует бесструктурность кривой с множеством пиков [56], тогда как поздняя менее интенсивная фаза имеет плавный угасающий тренд.

Спектр поздней стадии хорошо интерполируется степенным законом с показателем степени равным -1, хотя иногда может становиться круче [57]. Это, скорее всего, является проявлением условий среды, в которую помещён ГВ, и с которой взаимодействует расширяющаяся плазма и фотоны, перераспределяя свою энергию и переизлучая её в оптическом диапазоне. Раннее послесвечение в течении нескольких часов после детектирования всплеска проявляется в виде вспышечного выброса энергии, некоторые из которых могут коррелировать с аналогичной активностью в гамма и рентгеновском диапазонах—это, так называемая, “хроматичность” (chromaticity) поведения кривой блеска [58,59]. Исследования в этом направлении нацелены на нахождение связей между внутренней активностью областей производства энергии и её проявлением в различных диапазонах, включая оптический.

Послесвечение в радио диапазоне может наблюдаться в пределах от нескольких часов до нескольких лет от момента всплеска. Консенсус относительно радио излучения говорит, что оно происходит в среде, окружающей ГВ. Поведение кривой блеска в радио диапазоне, схожее с оптическим излучением, показывает сначала повышение, достигает пика на 3–6 день и затем сменяется убыванием, хорошо интерполируясь степенным законом с разными индексами. Здесь также была зафиксирована чёткая зависимость между общей оценкой энергии и детектируемостью радио послесвечения, где для длинных ГВ значение пиковой светимости на порядок величины больше, чем для коротких событий [60]. Статистика детектирования радио послесвечения колеблется в районе 30% для всей популяции. Также замечено, что радио яркие (radio bright) события значительно продолжительнее своих радио тихих (radio quiet) аналогов. Но, в то же время, имеется и другая точка зрения, где считается, что отсутствие радио сигнала вызвано высокой плотностью профиля окружающей среды (circumburst density profile), а не ввиду общей энергетичности событий [61].

Послесвечение высоких энергий (high-energy photons emission) в диапазоне МэВ–ГэВ отличается количеством крайне малым числом детектируемых фотонов. Наблюдения производятся в режиме счёта отдельных фотонов и каждый квант подробно изучается с применением статистических методов.

Неизвестным остаётся физическое происхождение излучения высоких энергий. Согласно анализу спектров ранние работы предположили несколько возможностей [62]: экстраполяция низкоэнергетического гамма спектра в область высоких энергий, существование дополнительной компоненты наряду с основным гамма излучением или подлинное послесвечение. При этом экстраполяция должна предполагать присутствие наблюдаемого обрезания в спектрах некоторых ГВ из-за других физических процессов, происходящих в области образования всплеска либо при распространении в межгалактическом пространстве либо их совокупности.

К настоящему времени существует небольшое количество публикаций [63], анализирующих всю популяцию ГВ с фотонами высоких энергий, среди которых центральное место занимают первый [64] и второй [65] каталоги ГВ. Гораздо больше исследований произведено и опубликовано в фокусе на какое-либо отдельное событие (или небольшую группу событий) с высокоэнергетичным излучением. В то время как изучение всей популяции высокоэнергетичных ГВ нацелено на ожидания единого механизма генерации ГэВ фотонов, то в последнем случае предпринимаются попытки

интерпретации явления в рамках парадигмы разрабатываемых моделей, следовательно, выбор того или иного объекта изучения нередко сопровождается селективными эффектами. Это, в целом, не сильно сказывается на общем результате ввиду ограниченных возможностей для корректной самосогласуемой физической интерпретации [65].

Как было отмечено выше, на данный момент наблюдается лишь улучшение показателей верхних пределов (upper limits) [66,67,68,69,70] относительно детектирования нейтрино от ГВ. Тем не менее начало многоканальной астрофизики (multi-messenger astrophysics) было положено именно в исследовании ГВ посредством детектирования гравитационных волн. Одно из событий регистрации гравитационных волн пространственно и по времени совпало с детектированием короткого гамма-всплеска GRB 170817A. Здесь читатель отсылается к статьям в журнале, целый выпуск которого [71] полностью посвящён этому событию GW 170817-GRB 170817A.

В **теоретическом** подходе важными для ГВ являются установление астрофизического объекта-предшественника всплеска, моделирование процессов протекающих на различных стадиях развития всплеска, общий и частный сценарий событий, правильная физическая модель, построение общей теории явления.

Интерпретация всегда являлась неотъемлемой частью наблюдений, и хроники теоретических идей всегда идут в тандеме с современным состоянием техники эксперимента. Мы лишь добавим, что загадка ГВ имеет множество ответвлений не только в области астрономии, но и в физике.

Уже в раннем обзоре [75] приводится большое количество теоретических сценариев с возможными механизмами образования ГВ. Это многообразие предложенных моделей вызвано естественным образом из-за небольшого количества информации о явлении. Тем не менее, было отмечено, что рабочая модель должна удовлетворять следующим наблюдательным критериям: 1) различные расстояния должны быть в согласии с пространственным распределением; 2) необходимо добиться соответствия с наблюдаемым энергетическим потоком в гамма лучах; 3) необходим механизм или сценарий производства фотонов с энергиями порядка 100 кэВ и выше с подобными спектрами для всех всплесков; 4) высвобождение большей части энергии в очень короткий промежуток времени со статистическими значениями в масштабах миллисекунд. Естественно, что ожидалась разработка всех предложенных сценариев до уровня, доступного тестированию, то есть наблюдательному подтверждению.

Весьма интересно, что консенсус не был достигнут по мере накопления статистики в первые два десятка лет, и многие модели, порой весьма экзотические, не могли быть отброшены ввиду отсутствия измеренных расстояний до объектов.

В последующем обзоре [76] были достигнуты дальнейшие наблюдательные и модельные ограничения, такие как: 1) эксперимент и его результаты; 2) ограничения по размеру источника излучения; 3) пространственное распределение большего числа объектов; 4) результаты по расчёту магнитного поля в источнике.

Касательно экспериментальных ограничений были получены следующие зависимости: пиковая интенсивность энергетического потока $\sim 10^{-4} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, изотропная светимость $L_{\text{iso}} = 10^{34} (d/\text{pc})^2 \text{ эрг с}^{-1}$, где d —расстояние до объекта; быстрые флуктуации на временах порядка миллисекунд; длительность события не превышающая 100 секунд; низкая вероятность повторения всплесков; незначительные вариации энергетического спектра в различных ГВ для статистического соответствия с наблюдаемыми данными; отсутствие эмиссионных линий.

Вычисленная верхняя граница для размера источника излучения для случаев релятивистского или нерелятивистского расширения задаётся как, соответственно, $l \lesssim 10^9 \text{ см}$ или $l \lesssim 10^9 \gamma^{-2} \text{ см}$, где $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$. Являясь условной, нижняя граница для размера источника определяется соотношением между средней энергией гамма фотонов к числу излучающих электронов. Схожие значения энергий задают лимит самопоглощения на максимальное значение светимости через уравнение $kt \sim \langle E_e \rangle$. Используя закон Стефана

$L \lesssim 4\pi l^2 \sigma (\langle E_\gamma \rangle / k\gamma)^4$, а также значение потока S и оценку расстояния до объекта, мы получаем нижнюю границу на размеры излучающего района $l \gtrsim (\gamma k / \langle E_\gamma \rangle)^2 (S/\sigma)^{1/2} d$ см. В общем виде, это случай теплового равновесия и механизма тормозного излучения (Bremsstrahlung) с $\langle E_e \rangle \sim \langle E_\gamma \rangle / \gamma$, и не выполняется в случае магнитотормозного (синхротронного) излучения (synchrotron), где $\langle E_e \rangle \gg \langle E_\gamma \rangle$.

Пространственное распределение требует, чтобы источники ГВ были распределены изотропно в согласии с результатами производимых наблюдений.

Ограничения по магнитному полю были предложены впервые. Оценки для собственной светимости галактических ($\sim 10^{38}$ эрг s^{-1}) и внегалактических (10^{48} эрг s^{-1}) ГВ с предположении механизма синхротронного излучения дают оценки минимального значения силы магнитного поля в $B = 10^6$ Гаусс (галактические ГВ) и $B = 10^{11}$ Гаусс (внегалактические ГВ) с явным кандидатом нейтронной звезды.

Были обозначены следующие теоретические разработки: внегалактические модели, аккреция на компактные объекты, термоядерные взрывы, вспышки и другие экзотические модели. В частности, предположение о внегалактической природе исключает сразу множество моделей ввиду недостаточности требуемого количества энергии при выбросе. Теоретические разработки в моделях аккреции на компактные объекты притягивали большое внимание из-за совместимости пространственного распределения ГВ с распределением пульсаров. Несмотря на очень ограниченные знания о распределении белых карликов на больших масштабах и отсутствия идентификации чёрных дыр (двойная система Cyg X-1 была на тот момент уже известна как наиболее подходящий кандидат на роль чёрной дыры), разработки в сфере аккреции на компактные объекты представлялась как наиболее перспективные для объяснения природы гамма-всплесков.

Другой детальный обзор теоретических исследований был дан Ламбом [77]. Также как и в ранних работах здесь приводились модели с тепловым релятивистским спектром от образования пар [78,79], с тепловым спектром от тормозного излучения (Bremsstrahlung) [80], с тепловым спектром от комптоновского рассеяния [81], и даже работы с тепловым спектром от синхротронного излучения [82,83]. Авторы пришли к выводу, что модели с тепловым спектром не могут в полной мере описать спектр ГВ, который в широком диапазоне длин волн описывается степенным законом. Касательно нетепловых моделей авторы рассмотрели ранее предложенные: однократное комптоновское рассеяние на нетепловых электронах [84], многократное комптоновское рассеяние [85], нетепловое синхротронное излучение с введением моноэнергетичных электронов [86] и электронов с энергиями, распределёнными по степенному закону [87]. Авторы сфокусировались на механизме повторяющихся комптоновских рассеяний мягких фотонов на электронах с энергиями, распределёнными по степенному закону и расширили предыдущие методы [85] включением эффекта от оптически толстого теплового фона от электрон-позитронных пар [88]. Причина такого включения вызвана необходимостью учёта так называемого “параметра компактности” $l \equiv \frac{L\sigma_T}{Rm_e c^3}$, известного из физики Активных Ядер Галактик (АЯГ). Следовательно, была рассмотрена двухкомпонентная комптоновская модель и определены температуры тепловых пар через баланс их функций “остывания” из-за обратного комптоновского рассеяния мягких фотонов, и функции “нагрева” из-за комптоновского рассеяния и кулоновского сталкивания с нетепловыми парами. Авторы пришли к выводу, что тепловая компонента должна присутствовать всегда и спектр всё же может быть походить на тепловой из-за значений оптической толщи $\ll 1$ для нетепловых частиц.

Последующая обзорная работа [89] делает акцент на следующие аспекты: 1) происхождение всплесков и источников энергии; 2) ускорение частиц; 3) излучение и процессы рождения пар; 4) формирование спектра. Из кандидатов на предшественника ГВ были изучены различные конфигурации нейтронных звёзд, такие как объекты с эпизодической аккрецией, вращением, магнитным полем, звездотрясения, а также

массивные звёзды претерпевающие термоядерную вспышку. Среди возможных механизмов ускорения были рассмотрены магнитные переподключения, различные процессы в плазме, крупномасштабные электрические поля, и ударные волны. С основным фокусом на электрон-позитронные пары были изучены механизмы рождения пар (одnofотонных и двухфотонных), а также широко обсуждаемые механизмы уничтожения пар (аннигиляция пар, комптоновское рассеяние, тормозное излучение и кулоновское рассеяние, двухфотонный распад и деление фотона).

В той же работе обсуждались свойства ГВ в контексте общепринятых ограничений на область излучения (оптически тонкое/толстое состояние плазмы, магнитное поле— гипотеза больших значений полей, а также свойства локальной геометрии). Также поставлен вопрос о жизнеспособности предположения тепловой компоненты в спектрах, которые обсуждались ранее в литературе. Были приведены работы, где аргументируется низкая конкурентоспособность по сравнению с нетепловым распределением частиц.

В целом все теоретические разработки, начиная от обнаружения ГВ до момента идентификации расстояния до них являются умозрительными, смотрите обзор моделей в статье Немирова [90]. Как было сказано выше, отсутствие надёжно измеренного расстояния до объектов не позволяло полностью отбросить из рассмотрения даже самые провальные сценарии и гипотезы. Однако, не только дистанция, но также и отсутствие сигнала в других областях электромагнитного спектра поддерживало многие модели в этой гонке теоретических идей.

Возможно, что первый из физически самосогласованных сценариев для космологических ГВ был описан в работах Пажинского [79] и Гудмана [78], которые и сейчас могут быть использованы в качестве исходной точки для построения модели всплесков. Упрощенная модель рассматривает сферу из чистой энергии (плазма из электронов и позитронов) размером с нейтронную звезду с температурой (плотностью энергии) выше 1 МэВ, которая может расширяться свободно в пространстве. Очевидно, что для таких больших значений энергий неизбежно возникают эффекты релятивистского расширения и состояние оптически непрозрачной среды. Данная модель приводит к производству очень жёсткого спектра чернотельного типа и источник такого излучения находящийся на космологических расстояниях должен выдавать общую изотропную энергию порядка 10^{53} эрг.

Идеализированное предположение о чистой энергии в виде электрон-позитронной плазмы было дальше обобщено [91] через включение барионной материи. Был сделано заключение, что даже небольшое количество барионов приведёт к увеличению кинетической энергии выброса через уменьшение радиационной энергии. Всё это в итоге влияет на общую динамику системы.

Одной из необходимых для разрешения проблем является интерпретация нетеплового спектра. Попытка описания физики извлечения энергии через диссипационные процессы была сделана Ризом и Месжаросом в серии работ [92,93]. Сама диссипация энергии имеет целью преобразование кинетической энергии выброса обратно в энергию излучения. Данное явление получило дальнейшее развитие в более широком контексте релятивистских и нерелятивистских ударных волн—внутренних и внешних.

В рамках сценария расширяющегося выброса—внешней передней ударной волны (external forward shock)—было высчитано присутствие послесвечения в разных длинах волн по аналогии с радио пульсарами, АЯГ и остатками выброса сверхновых (Supernova Remnants, SNR) [94,95]. Ярким примером предсказательной силы теоретических моделей [96] является наблюдение оптического послесвечения в течении нескольких часов после всплеска и появление радио послесвечения на промежутках времени от нескольких дней до нескольких недель после всплеска—сигналов достаточной интенсивности, чтобы быть задетектированными инструментами той эпохи. Были рассмотрены два сценария— мгновенное вливание (instant injection) и выдувание по типу ветра—наряду с рассмотрением двух типов геометрий—сферическое расширение и коллимированный

выброс по типу джета. В результате была дана оценка поведения кривой блеска (потока фотонов) для диапазонов рентгеновского, оптического и радио послесвечения как убывающей во времени по степенному закону.

Действительно, историческое детектирование GRB 970228 в рентгеновском и оптическом диапазонах [97,98], а позже и обнаружение радио послесвечения [99] от GRB 970508 подтвердили множество теоретических предсказаний. После этого стало возможно измерять расстояние до всплесков и теоретический подход нуждался в новом взгляде на физику ГВ.

Касательно поиска центральной машины излучения, то большие значения светимости и высокая степень изменчивости во времени указывают на то, что гамма-всплески ассоциированы с катастрофическим взрывом с последующим остатком в виде компактного объекта. И хотя количество известных типов компактных объектов невелико—белые карлики, нейтронные звёзды, чёрные дыры—их экстремальная природа содержит множество неизвестных факторов, которые бросают вызов множеству теоретических и наблюдательных исследований. Более того, задача значительно усложняется в случае рассмотрения двойной системы, состоящей из двух компактных объектов, в качестве системы-предшественника.

Если же опираться на наблюдательные ограничения, то центральный объект должен соответствовать следующим критериям: 1) энергетический бюджет в интервале $E_{\text{iso}} \sim 10^{49} - 10^{55}$ эрг и светимость $L \sim 10^{47} - 10^{54}$ эрг с^{-1} ; 2) возможность создавать и ускорять выброс до ультра-релятивистских скоростей; 3) необязательная, но возможная большая продолжительность центральной машины; 4) выброс различной элементной композиции.

Теоретические разработки представили несколько моделей с использованием кандидатов на роль центральной машины: чёрная дыра с аккреционным диском [100], сильно намагниченная нейтронная звезда [101,102], система двойной нейтронной звезды [103,78,79]. Предполагается, что они должны наблюдаться посредством следующих механизмов: коллапсирование ядра (core-collapse), слияние, фазовый переход и другие. Модели центральной машины получили дальнейшее развитие с накоплением новых данных, и на данный момент существует настоящее изобилие эффектов, которые теория предсказывает для них. Тем не менее, они всё ещё привязаны к компактным объектам и, например, одна из недавних обзорных работ [104] исследует два возможных исхода от слияния пары нейтронных звёзд в двойной системе: чёрная дыра с аккреционным диском или сильно намагниченный миллисекундный пульсар. В частности они предсказывают результирующее многокомпонентное электромагнитное излучение и ожидают, что успехи в данной области продвинут вперёд понимание физики слияния компактных объектов, а также уточнение уравнений состояния для нейтронных звёзд. Другая обзорная работа [105] пересматривает прогресс в области магнитного пенроузовского процесса (magnetic Penrose process), который используется для извлечения вращательной энергии чёрной дыры. Авторы утверждают, что такой процесс может питать множество высокоэнергетичных участков излучения, а также предсказать большое количество наблюдательных эффектов.

Относительно динамики расширяющейся плазмы было показано, что вещество будет обладать дополнительными физическими свойствами, вызванными экстремальными условиями состояния. Такие эффекты включают и релятивистские [106]—релятивистская горячая плазма и релятивистское движение общей массы, эффекты радиационных процессов такие как синхротронное и обратное комптоновское радиационное охлаждение, а также эффекты образования и уничтожения электрон-позитронных пар, и другие. Утверждается, что примеры такого рода эффектов присутствуют вокруг центральных машин ГВ в указанных выше или множества других сценариев. В этих вопросах численное моделирование задействует огромные вычислительные ресурсы, приводя моделирование магнетогидродинамической плазмы к новым рубежам [107]. Всему этому

многообразию методов поставлена единственная задача—дать реалистичное описание явления ГВ, органично сочетая наиболее успешные теоретические разработки, некоторые из которых мы очень кратко обозначим ниже.

В работе Пирана [108] были собраны и обобщены главные теоретические успехи своего времени. Было принято во внимание, что различные комбинации граничных и начальных условий всплесков соответствуют разным эпизодам наблюдательной активности, то есть фазам основного излучения и послесвечения.

Широко применяемая файэрбол (fireball) модель [109] использует несколько хорошо изученных ингредиентов. В ней предполагается, что изначальная плазма из электронов и позитронов может расширяться свободно в пространстве вследствие взрыва объекта-предшественника. Результат наблюдается в виде кривой блеска высокой степени изменчивости в основной фазе излучения. Утверждается, что плазма естественным образом может создавать ударные волны, внутренние и внешние, которые наряду с магнитным полем, сжатием и турбулентностью делают механизм синхротронного излучения релятивистских электронов доминирующим для описания спектров ГВ. Также механизм обратного комптоновского рассеяния низкоэнергетичных фотонов на релятивистских электронах был предложен для интерпретации высокоэнергетичной компоненты спектра, так называемый синхротрон-обратно-комптоновский механизм (Synchrotron-Self-Compton mechanism).

Далее читатель отсылается к современной литературе по теоретическим моделям гамма-всплесков, описание которых выходит за рамки нашего обзора и посвящены более специфичным вопросам [110,111,112,106,104,113,114].

2. МЕТОДЫ

Методологически поиск и изучение сценариев для гамма-всплесков происходит как в прямом так и в обратном направлениях, означающая, что разработка моделей может исходить из рассмотрения центрального объекта через расширение плазмы и излучение посредством радиационных процессов или исследование механизмов, ответственных за какое-либо определённое проявление наблюдательной активности. Можно заметить, что прямой подход, скорее, свойственен для теоретических разработок, тогда как обратный подход—для наблюдений и последующей интерпретации. Однако, в современных исследованиях эти методы тесно связаны, что делает сложным какие-либо разграничения.

2.1 Общие аспекты исследований

К методам исследований гамма-всплесков, традиционным также и для большинства областей современной астрофизики, следует относить:

- наблюдения (эксперимент);
- теория;
- численное моделирование;
- феноменология (анализ данных).

Каждый из вышеперечисленных методов, в свою очередь, подразделяется на более специфичные категории, и, в зависимости от конкретной задачи и условий, может сам представлять целую область для исследований. Так, к методам наблюдений гамма-всплесков следует, в общем случае, относить наземные и космические наблюдения, которые, в свою очередь, могут подразделяться на наблюдения электромагнитных (фотоны) или неэлектромагнитных (нейтрино, гравитационные волны) сигналов; теоретические методы подразделяются на поиски центральной машины (central engine), динамики расширяющейся плазмы и радиационных процессов; численное моделирование помогает преодолеть трудности аналитических решений обозначенных теоретических методов; анализ наблюдательных данных позволяет выявить скрытые зависимости различных физических параметров. Безусловно ясно, что такое разнообразие методов образовалось не одномоментно, а с накоплением знаний о предмете исследований, а также

с развитием техники эксперимента и теории, и, тем более ясно, что всё это разнообразие методов дополняет друг друга и, в конечном счёте, должно привести к пониманию нами целостной природы явления гамма-всплесков.

Опираясь на вышесказанное, мы видим, что в Астрофизическом Институте нам доступны все методы исследований. Наземными оптическими телескопами на обсерваториях Ассы-Тургень и Тянь-Шаньская Астрономическая Обсерватория (ТШАО) алертные наблюдения (alert observations) ведутся уже на протяжении нескольких лет и были получены кривые блеска оптического послесвечения для сотен уникальных ГВ. Невозможность собственных исследований с помощью запусков космических гамма и рентгеновских телескопов компенсируется, однако, свободным доступом к наблюдаемым данным этих обсерваторий. Всё это создаёт возможность всестороннего анализа накопленных данных, их интерпретации и численного моделирования.

2.2 Исследования индивидуальных всплесков

Изучение одиночных событий позволяет наиболее детально проработать весь вероятный набор механизмов и зависимостей. В целом, опять-таки, всю процедуру можно поделить на этапы: наблюдения, анализ и интерпретация результатов.

Сами ГВ наблюдаются индивидуально, вспыхивая в небе без проявления какой-либо активности, предшествующей самому всплеску. Соответственно, первыми их фиксируют гамма-телескопы с большим полем зрения. В настоящий момент действующими миссиями по исследованию ГВ являются *Fermi*-GBM-LAT, *Swift*-BAT, *Insight*-HXMT и другие. Они преследуют две основные цели: измерение приходящего потока и локализация объекта; последняя используется для наведения и поиска в этом поле ранее неотожествлённого источника со стремительно падающим блеском (интенсивностью) в рентгеновском и далее в оптическом и радио диапазонах.

Большая часть энергии ГВ приходится на гамма диапазон, анализ данных которых унифицирован и сводится к следующим стандартным процедурам.

Анализ низкоэнергетичного гамма-излучения мы рассмотрим на примере редукции и обработки данных, полученных инструментом *Fermi*-GBM (Gamma-Ray Burst Monitor). Инструмент GBM [72] состоит из 12 сцинтилляторов NaI(Tl) (8–1000 кэВ) и 2 сцинтилляторов BGO (150 кэВ–30 МэВ) для детектирования гамма фотонов по всему небу. Данные наблюдений образуют файлы двух видов STIME и CSPEC, в которых отсчёты (сигнал) сохраняются с разным временным и спектральным (энергетическим) разрешением. При этом наряду с самими файлами наблюдений (сигнал, матрица отклика, параметры спектральной эффективности) хранятся и вспомогательные файлы инструмента и телескопа (ориентация аппарата, информация о вращении (доворота) к объекту, номер наблюдавшего детектора, продолжительность приёма сигнала каждого детектора, разрешение и прочее). Данные наблюдений всех ГВ находятся в открытом доступе. Существуют два вида анализа данных в гамма диапазоне: интегрированная по времени (time-integrated) и детализированная по времени (time-resolved). Первая из них исследует излучение, комбинированное по времени полной продолжительности T_{90} , в то время как вторая изучает отдельные элементы кривой блеска, в предположении каких-либо физических механизмов. Временное разрешение инструмента позволяет работать с частотой приёма сигнала до 2 мкс; по умолчанию оптимальное разрешение сигнала выставлено на величине 64 мс. При этом следует отметить, что детализированный анализ обычно выявляет зависимости, которые скрыты при интегрированном анализе, следовательно, предпочтительнее для коротких ГВ.

Для анализа данных с инструмента GBM мы извлекаем из базы данных для интересующего нас события Time-Tagged Event (TTE) файлы и Response (RSP) файлы с достаточным соотношением сигнала к шуму. Стандартная процедура подготовки и анализа данных предоставляется *Fermi Science Support Center* (<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc>) и состоит из задания рабочего

энергетического интервала, отделении (вычитании) шума из сигнала, определении рабочего временного интервала содержащего сигнал основного излучения и его разбивку/слияние по временным ячейкам (binning) для заведомо хорошего отношения сигнала к шуму. За этим следует процедура интерполяции (fitting) различными модельными функциями и их комбинациями (вложениями), среди которых для ГВ используются следующие: степенной закон (PL), функция Band, степенной закон с экспоненциальным обрезанием (Cutoff PL), модель чёрного тела (BB), и другие.

Результатом интерполяции данных моделью является кривые блеска и спектры с вычисленной статистикой; последняя определяет лучшую из использованных моделей посредством выбранной статистики (хи-квадрат для больших отсчётов с гауссовым распределением или си-статистика для малого числа отсчётов с пуассоновым распределением). Мы используем опцию си-статистика (C-Statistic), рекомендованную в стандартных процедурах пакета RMFit и преимущество данной статистики перед хи-квадрат состоит в том, что она может работать с негауссовой счётной статистикой (малым числом отсчётов, то есть, слабым сигналом), что проявляется в случае коротких всплесков. Си-статистика Кастора является модифицированной версией статистики log-likelihood, которая основана на статистике Кэша [73], она используется для интерполирования данных через минимизацию. Недостатком си-статистики является то, что она не предусматривает проверку адекватности модели (goodness-of-fit test) как, например, минимизация хи-квадрат статистики, так как по умолчанию не существует стандартного распределения вероятности для статистики правдоподобия [74].

Дальнейший анализ предполагает интерпретацию кривой блеска и спектра с наилучшей моделью, полученной при различных вариантах процедуры интерполяции: интегрированная по времени или детализированная по времени в зависимости от эволюции сигнала, спектральная жёсткость по отношению к энергетическим интервалам, различные комбинации разбивки/слияния сигнала по временным ячейкам (time binning) и по энергетическим каналам (energy binning).

Анализ фотонов высоких энергий 0,1–100 ГэВ от инструмента *Fermi-LAT* (Large Area Telescope) производится по следующему алгоритму действий. Как было указано выше, все данные наблюдений находятся в открытом доступе, все ГВ каталогизированы и доступны для целей выборки по различным критериям. Подготовка к анализу LAT состоит из извлечения данных наблюдения по параметрам времени всплеска, временного интервала, положения на небе и энергетического интервала для запрашиваемых данных. Дальнейшими шагами являются локализация события и генерация файлов, необходимых для самого анализа. Последняя процедура включает в себя моделирование остаточного и изотропного фонового излучения в гамма диапазоне посредством вычисления карты экспозиции (exposure map) и использование подходящей модели для галактической и внегалактической диффузной компонент.

Спектральный анализ излучения высоких энергий осуществляется для двух этапов: фазы основного излучения и фазы продолжительного излучения (extended emission). Соответственно, существуют комбинированные и некомбинированные по временным ячейкам модели для анализа, в неявном предположении, что излучение в низких энергиях (кэВ–МэВ основного излучения) оказывает влияние и имеет связь с фотонами от LAT. Метод правдоподобия (likelihood) используется здесь в качестве основного статистического метода, который вычисляет вероятность получения данных при заданной модели с параметрами для оценки. Спектральные параметры модели варьируются, чтобы максимизировать функцию правдоподобия и, соответственно, минимизировать значение хи-квадрат. Необходимыми пунктами для интерполяции спектра являются: 1) выбор области пространства—область источника (широкая) и область интереса (узкая, обычно 10 градусов)—для анализа; 2) выбор спектральной моделей, включая сам источник гамма излучения и ближайшие источники, а также модель диффузного излучения, функциональная форма спектра источника и значения спектральных параметров; 3)

предварительное вычисление величин для функции правдоподобия через вычисление варьируемых параметров; 4) одновременная интерполяция (fitting) источника и ближайших объектов, которая задействует многократное перевычисление функции правдоподобия для различного набора пробных параметров до тех пор, пока не установится значение, достаточно приближённое к максимуму.

Проверка адекватности модели (goodness-of-fit test) для вышеописанной интерполяции спектра может быть определена через вероятность нахождения наблюдаемого значения действующей статистике хи-квадрат. В последнем пункте мы опираемся на общую статистику, где в области высоких энергий в спектре ГВ предполагается, что распределение фотонов по энергии имеет вид степенного закона с индексом $\alpha \approx -1$, сопровождаемого гауссовым распределением ошибок.

Следуя инструкциям, описанным в первом и втором каталогах *Fermi-LAT* [64,65] для детализированного по времени анализа мы обычно делим данные по отсчётам каждого события на логарифмически равные интервалы и производим анализ методом правдоподобия. Если величина тестовой статистики (TS или test statistic, параметр, фиксирующий максимальное значение функции правдоподобия) меньше 16, то мы объединяем соседние ячейки и повторяем анализ методом правдоподобия. В результате данной процедуры мы получим значение потока фотонов (photon flux), которое мы дальше можем использовать для построения кривой блеска излучения высоких энергий. Используя значение измеренного расстояния до объекта, мы можем конвертировать значение потока в единицы светимости и дальше уже работать в системе отсчёта каждого объекта по отдельности.

Значения полной энергии E_{LAT} в диапазоне 0,1–100 ГэВ можно вычислить путём умножения средней светимости в каждой временной ячейке с соответствующей продолжительностью в системе покоя источника, и затем просуммировав все ячейки. Следует отметить, что на поздних временах наблюдения фотонов высоких энергий ограничены пороговой чувствительностью инструмента и ожидается, что вклад на поздних временах относительно небольшой. Тем самым, мы понимаем, что вычисленное значение энергии E_{LAT} представляет собой нижний предел от изотропной энергии в ГэВ диапазоне от ГВ.

2.3 Исследования популяций всплесков

Изучение совокупности событий, в общем случае, может подразделяться на анализ всей популяции, а также на выявление природы какой-либо части от всей популяции. Естественным для последнего является присутствие этапа выборки по заданным критериям, тогда как, в целом, анализ данных, интерполирование спектров моделями и прочие этапы аналогичны тем, что производятся для каждого события в отдельности.

В Астрофизическом Институте нами начаты работы по изучению популяции коротких и длинных по продолжительности ГВ без измеренных красных смещений [115]. Здесь мы предпринимаем попытку вычислить энергию гамма-всплесков без известных расстояний на основе выборки событий с наблюдаемым красным смещением. В предположении, что вся популяция из более чем двух тысяч уникальных объектов [65] подчиняется бимодальному распределению по продолжительности, а также используя данные из каталога GBM GRB [34], мы вычисляем изотропно-эквивалентную энергию для каждого всплеска, учитывая средние значения красного смещения для распределения коротких/длинных ГВ. Мы также производим взаимную корреляцию каталога GBM GRB с общим каталогом GBM Trigger Catalog для получения информации об угле прицеливания LAT в момент обнаружения события.

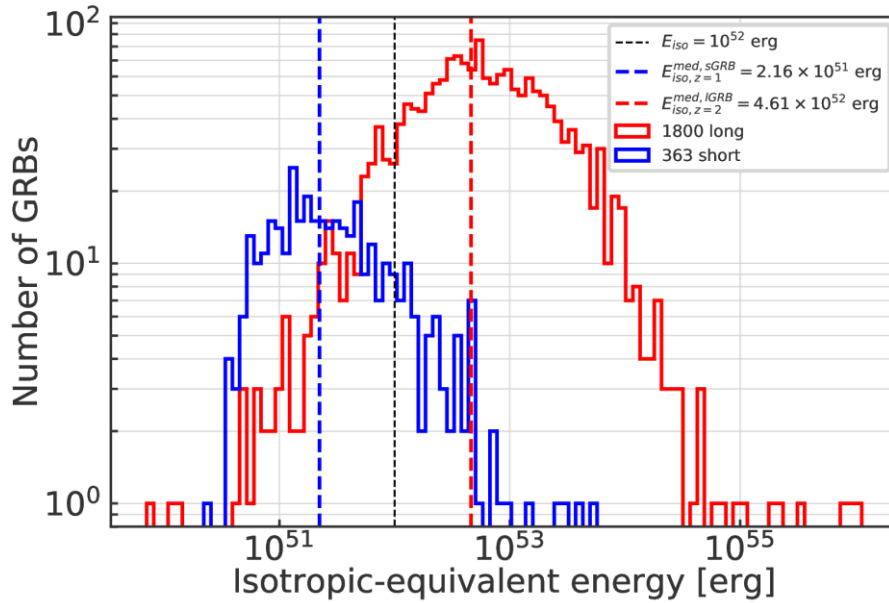


Рисунок 1. Гистограмма распределения изотропно-эквивалентной энергии для 363 коротких и 1800 длинных ГВ для декады наблюдений космической миссии *Fermi*. Значения энергий были вычислены в предположении средних красных смещений для коротких ($z=1.0$, синий цвет) и длинных ($z=2.0$, красный цвет) гамма-всплесков. Чёрная пунктирная линия обозначает значение энергии $E_{iso}=1e52$ эрг. Пунктирные синяя и красные линии обозначают медианные значения энергии для каждого типа ГВ.

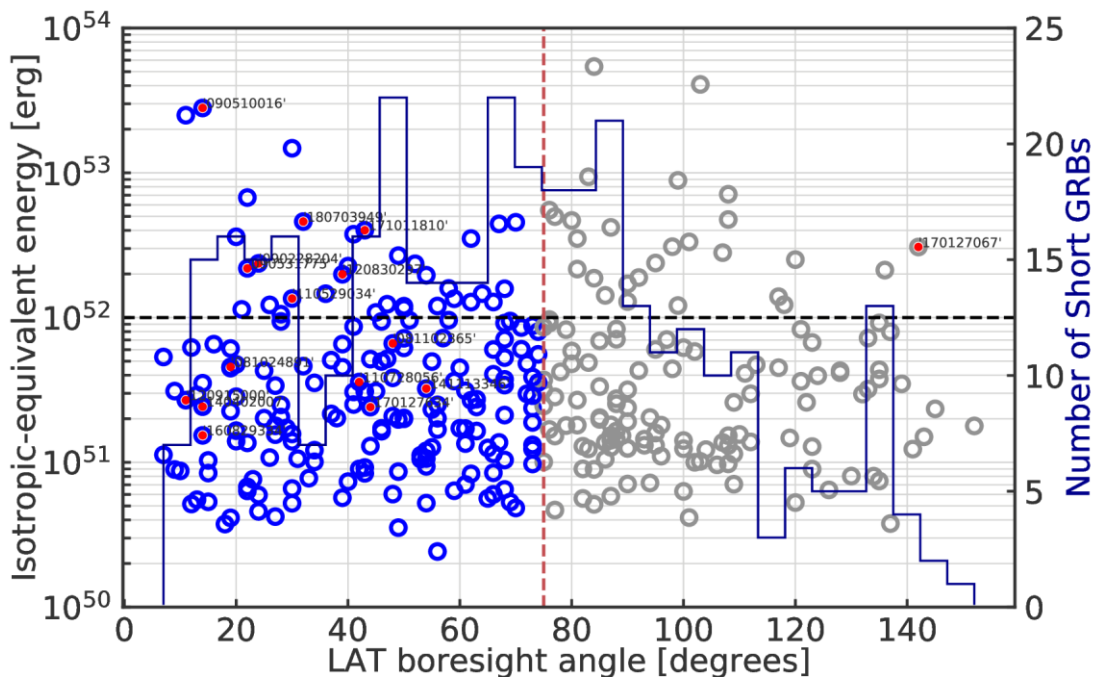


Рисунок 2. Распределение 363 коротких ГВ по углу прицеливания инструмента LAT и значениям изотропно-эквивалентной энергии, вычисленной в предположении среднего красного смещения $z=1$. Вертикальная пунктирная линия обозначает угол $\theta=75$ градусов, являющийся пороговым для детектирования инструмента LAT, горизонтальная пунктирная линия обозначает значение энергии $E_{iso}=1e52$ эрг.

Первые результаты исследования ГВ без измеренных расстояний показывают (Рисунок 1, Рисунок 2), что имеется общее согласие со средним наблюдаемым расстоянием для каждого из коротких/длинных ГВ, также вычисления пределов красных

смещений не выходит за рамки наблюдаемых расстояний, соответственно, вычисленные значения изотропной энергии лежат в интервалах, характерных для большинства ГВ.

Основной целью исследования ГВ без измеренных красных смещений является использование большого количества данных, которые в данный момент не находят себе применения ввиду отсутствия измеренных расстояний. К примеру, только 10% ГВ, задетектированных телескопом *Fermi*, имеют измеренные расстояния, соответственно могут быть использованы для корректной физической интерпретации явления. Именно измеренное расстояние до объекта позволяет оценить энерговыделение события и в полном объёме интерпретировать физические процессы, задействованные при его образовании. Также оценка начальной или полной энергии является ключевой информацией при задании параметров при численном моделировании ГВ и оценке параметров предшественника.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ

3.1 Исследования с помощью оптических телескопов института

За период с 2014 по 2020 годы силами сотрудников института (Кругов М.А., Рева И.В., Кусакин А.В., Ким В.Ю.) в тесном сотрудничестве с отечественными (Смут Дж., Гроссан Б. – Экстремальная Космическая Лаборатория, Назарбаев Университет, Нур-Султан, РК) и зарубежными исследовательскими институтами и центрами (Позаненко А.С. – Институт космических исследований РАН, Москва, РФ) проведены алертные наблюдения оптического послесвечения гамма-всплесков. Оптическое послесвечение от более чем 150 уникальных гамма-всплесков было задетектировано на телескопах Тянь-Шаньской Астрономической Обсерватории (ТШАО) и Обсерватории Ассы-Тургень, было отправлено около 100 телеграмм GCN (<https://gcn.gsfc.nasa.gov/>) с измеренными значениями блеска от быстроугасающих транзиентов, задетектированы послесвечения нескольких гамма-всплесков, ассоциированных со сверхновыми звёздами, по результатам наблюдений опубликовано несколько работ в рамках обширной международной коллаборации [117,118,119,120,121].

Исследователи института также принимали участие во всемирной кампании (более 70 наземных и космических обсерваторий с телескопами, работающими в различных диапазонах всего электромагнитного спектра) по обнаружению электромагнитного послесвечения от источника гравитационных волн [116], успех которой подарил миру новое направление исследований—многоканальную астрофизику (Multi-Messenger Astrophysics).

3.2 Перспективы исследований гамма-всплесков в Казахстане

Имеющаяся наблюдательная база (телескопы с диаметром зеркала 0,7-метра, 1-метр и 1,5-метра, приёмное оборудование) в данный момент позволяет выполнять алертно-поисковые наблюдения оптического послесвечения от гамма-всплесков. Пределы детектирования возможно улучшить, обновив приёмную аппаратуру, например, используя приборы с высокой квантовой эффективностью. Это позволит фотометрически и спектрально детектировать слабые объекты, среди которых находится класс ГВ, ассоциированных со сверхновыми звёздами, представляющий повышенный интерес научного сообщества в последние годы. Также и механическая часть некоторых инструментов, ответственная за управление и наведение телескопа, может быть подвержена небольшой доработке и усовершенствованию.

К существенным изменениям для исследований ГВ можно будет отнести возможность автоматизации процессов наблюдения. Это целый комплекс мер, включающий в себя слаженную работу всех систем, начиная от контроля погоды и заканчивая прогнозированием статистически важных участков для поисковых наблюдений по большому полю, как в случае с источником гравитационных волн. При

этом возможно уменьшить участие человека во всём процессе наблюдений до 10%. Несомненно, усовершенствования данного типа потребуют использования знаний машинного обучения и представляют, скорее, работу с программным обеспечением. Работа, уже выполненная в этом направлении, включает удалённое управление телескопами, в том числе дистанционные наблюдения через интернет.

К общим перспективам теоретических исследований для института можно будет отнести создание направления исследований «Астрофизика высоких энергий», где будет возможно объединить усилия по изучению галактических и внегалактических объектов, излучающих помимо прочего в рентгеновском и гамма диапазонах. Указанное направление будет заниматься анализом и интерпретацией данных с космических телескопов, сделает упор на физику экстремального состояния вещества (физика плазмы), дополнит и расширит текущие исследования оптических телескопов института, сделает возможным использование вычислительных кластеров института для численного моделирования развития вспышек.

Касательно теоретического исследования ГВ, то учитывая специфику объектов, наиболее плодотворным для института будет поиск событий, проявляющих активность в оптическом диапазоне. К последним можно отнести ГВ, ассоциированные со взрывами сверхновых звёзд—классом объектов, перспективных с теоретической точки зрения, потому что к предшественникам взрывов данного класса сверхновых относят звёзды Вольфа-Райе позднего спектрального класса. Комплексное исследование самых ближайших галактических звёзд Вольфа-Райе позволит исследовать связь ГВ-сверхновая с эволюционной точки зрения, а также сделать прогноз на события гамма-всплеска в нашей галактике.

Также необходимо продолжать и совершенствовать алгоритмы и протоколы по алертно-поисковым и сопроводительным (follow-up) наблюдениям ГВ, ассоциированных с источниками гравитационных волн. Здесь, несомненно, необходима широкая международная коллаборация, где опыт зарубежных исследователей по поиску сигнала гравитационных волн на оптических телескопах среднего размера позволит повысить качество наблюдений, проводимых в институте. Понимание теоретических разработок и физики гравитационных волн требуют коллаборации с крупными теоретическими центрами и постоянным обменом научной информацией.

3.3 Общие перспективы

Исследования гамма-всплесков на сегодняшний день являются перспективным направлением современной наблюдательной и теоретической астрофизики. Наивысшей целью этих исследований является понимание природы этих загадочных явлений: от предшественников, через эволюционные процессы, до сценария взрыва с выделением большой энергии и излучением электромагнитных и неэлектромагнитных сигналов.

Являясь направлением фундаментальных исследований, знания, полученные от исследований, всё же, могут в дальнейшей перспективе принести огромную пользу в сферах разработки высокоэнергетичных двигателей на управляемых ядерных и термоядерных реакциях, радиационной защиты в рамках космических полётов, а также в масштабах планетной защиты от разрушающих радиаций и катастрофических взрывов в нашем ближайшем космическом окружении.

Список использованной литературы:

1. Ackermann M., et al. (2014) *Science*, **343**, 42.
2. Fishman G. J., et al. (1985) *International Cosmic Ray Conference*, **3**.
3. Barthelmy S. D., et al. (2009) *GCN*, **10251**.
4. Peng Z. Y., et al. (2010) *ApJ*, **718**, 894.
5. Charisi M., Márka S., and Bartos I. (2015) *MNRAS*, **448**, 2624.
6. Norris J. P., et al. (1996) *ApJ*, **459**, 393.
7. Golenetskii S. V., Mazets E. P., Aptekar R. L., and Ilinskii V. N. (1983) *Nature*, **306**, 451.
8. Fazio, G. G. *AnnRevA&A*, **5**, 481.

9. Oda, M. (1965) *International Cosmic Ray Conference*, **1**, 68.
10. Mazets E. P. and Golenetskii S. V. (1981) *ASpSc*, **75**, 47.
11. Klebesadel R. W., Strong I. B., and Olson R. A. (1973) *ApJL*, **182**, L85.
12. Klebesadel R., et al. (1982) *ApJL*, **259**, L51.
13. Atteia J.-L., et al. (1987) *ApJS*, **64**, 305.
14. Oda M. (1965) *Applied Optics*, **4**, 143.
15. Ables J. G. (1968) *Proceedings of the Astronomical Society of Australia*, **1**, 172.
16. Dicke R. H. (1968) *ApJL*, **153**, L101.
17. Barthelmy S. D., et al. (2005) *Space Science Reviews*, **120**, 143.
18. Cline T. L. (1975) In *7th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, vol. 262 of ANYAS, pp. 159–163.
19. Mazets E. P., et al. (1981) *ASpSc*, **80**, 3.
20. Golenetskii S. V. (1988) *Advances in Space Research*, **8**, 653.
21. Hartmann D. and Epstein R. I. (1989) *ApJ*, **346**, 960.
22. Cline T. L., et al. (1980) *ApJL*, **237**, L1.
23. Mazets E. P., Golenetskii S. V., Gurian I. A., and Ilinskii V. N. (1982) *ASpSc*, **84**, 173.
24. Higdon J. C. and Lingenfelter R. E. (1990) *AnnRevA&A*, **28**, 401.
25. Mazets E. P., Golenetskii S. V., Ilinskii V. N., Aptekar R. L., and Guryan I. A. (1979) *Nature*, **282**, 587.
26. Golenetskii S. V., Ilinskii V. N., and Mazets E. P. (1984) *Nature*, **307**, 41.
27. Laros J. G., Fenimore E. E., Fikani M. M., Klebesadel R. W., and Barat C. (1986) *Nature*, **322**, 152.
28. Olausen S. A. and Kaspi V. M. (2014) *ApJS*, **212**, 6.
29. Meegan C. A., et al. (1992) *Nature*, **355**, 143.
30. Briggs M. S., et al. (1996) *AstJour*, **459**, 40.
31. Paciesas W. S., et al. (1999) *ApJS*, **122**, 465.
32. Lien A., et al. (2016) *ApJ*, **829**, 7.
33. Galli M., et al. (2013) *A&A*, **553**, A33.
34. von Kienlin A. et al. (2020) *ApJ*, **893**, 46.
35. Costa E., et al. (1997) *Nature*, **387**, 783.
36. van Paradijs J., et al. (1997) *Nature*, **386**, 686.
37. Galama T. J., et al. (1997) *IAU Circulars*, **6655**.
38. Metzger M. R., Cohen J. G., Chaffee F. H., and Blandford R. D. (1997) *IAU Circulars*, **6676**.
39. Bloom J. S., Djorgovski S. G., Kulkarni S. R., and Frail D. A. (1998) *ApJL*, **507**, L25.
40. Cline T. L., Desai U. D., Klebesadel R. W., and Strong I. B. (1973) *ApJL*, **185**, L1.
41. Mazets E. P., et al. (1981) *ASpSc*, **80**, 85.
42. Mazets E. P., et al. (1981) *ASpSc*, **80**, 119.
43. Norris J. P., et al. (1986) *Advances in Space Research*, **6**, 19.
44. Band D., et al. (1993) *ApJ*, **413**, 281.
45. Dingus B. L., et al. (1994) In *Gamma-Ray Bursts*, vol. 307 of *AIP Conference Series*, p. 22.
46. Goldstein A., et al. (2013) *ApJS*, **208**, 21.
47. Pélagion A., et al. (2008) *A&A*, **491**, 157.
48. Frontera F., et al. (2009) *ApJS*, **180**, 192.
49. Ryde F. (2005) *ApJL*, **625**, L95.
50. Ryde F. and Pe'er A. (2009) *ApJ*, **702**, 1211.
51. Rybicki G. B. and Lightman, A. P. (1986) *Radiative Processes in Astrophysics*, Wiley-VCH.
52. Nousek J. A., et al. (2006) *ApJ*, **642**, 389.
53. Zhang B., et al. (2006) *ApJ*, **642**, 354.
54. Boër M., et al. (2006) *ApJL*, **638**, L71.
55. Melandri A., et al. (2010) *ApJ*, **723**, 1331.
56. Li L., et al. (2012) *ApJ*, **758**, 27.
57. Oates S. R., et al. (2009) *MNRAS*, **395**, 490.
58. Dai X., et al. (2007) *ApJ*, **658**, 509.
59. Krühler T., et al. (2009) *ApJ*, **697**, 758.
60. Chandra P. and Frail D. A. *ApJ*, **746**, 156.
61. Lloyd-Ronning N. M. and Fryer C. L. (2017) *MNRAS*, **467**, 3413.
62. Band D. L., et al. (2009) *ApJ*, **701**, 1673.
63. Nava L. (2018) *IJMPD*, **27**, 1842003.
64. Ackermann M., et al. (2013) *ApJS*, **209**, 11.
65. Ajello M., et al. (2019) *ApJ*, **878**, 52.
66. Aartsen M. G., et al. (2015) *ApJL*, **805**, L5.
67. Aartsen M. G., et al. (2016) *ApJ*, **824**, 115.
68. Aartsen M. G., et al. (2017) *ApJ*, **843**, 112.
69. Abbasi R., et al. (2010) *ApJ*, **710**, 346.
70. Abbasi R., et al. (2012) *Nature*, **484**, 351.

71. *ApJL*, Volume **848**, Issue 2. <https://iopscience.iop.org/issue/2041-8205/848/2>
72. Meegan C., et al. (2009) *ApJ*, **702**, 791.
73. Cash W. (1979) *ApJ*, **228**, 939.
74. Protassov R. et al. (2002) *ApJ*, **571**, 545.
75. Ruderman M. (1975) In *Seventh Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, vol. 262 of *Annals of the New York Academy of Sciences*, pp. 164–180.
76. Verter F. (1982) *Physics Reports*, **81**, 293.
77. Lamb D. Q. (1988) In *Nuclear Spectroscopy of Astrophysical Sources*, vol. 170 of *AIP Conference Series*, pp. 265–284.
78. Goodman J. (1986) *ApJL*, **308**, L47.
79. Paczynski B. (1986) *ApJL*, **308**, L43.
80. Epstein R. I. (1986) In *IAU Colloq. 89*, vol. 255 of *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, p. 305.
81. Fenimore E. E. et al. (1982) In *Gamma Ray Transients and Related Astrophysical Phenomena*, vol. 77 of *AIP Conference Series*, pp. 201–209.
82. Lamb D. Q. (1982) In *Gamma Ray Transients and Related Astrophysical Phenomena*, vol. 77 of *AIP Conference Series*, pp. 249–272.
83. Liang E. P., Jernigan T. E., Rodrigues R. (1983) *ApJ*, **271**, 766.
84. Svensson R. (1987) *MNRAS*, **227**, 403.
85. Zdziarski A. A. and Lamb D. Q. (1986) *ApJL*, **309**, L79.
86. Ramaty R., Lingenfelter R. E., Bussard R. W. (1981) *ASpSc*, **75**, 193.
87. Brainerd J. J. and Lamb D. Q. (1987) *ApJ*, **313**, 231.
88. Zdziarski A. A. (1988) *ApJ*, **335**, 786.
89. Harding A. K. (1991) *Physics Reports*, **206**, 327.
90. Nemiroff R. J. (1994) *Comments on Astrophysics*, **17**, 189.
91. Shemi A. and Piran T. (1990) *ApJL*, **365**, L55.
92. Rees M. J. and Mészáros P. (1992) *MNRAS*, **258**, 41P.
93. Mészáros P. and Rees M. J. (1993) *ApJ*, **405**, 278.
94. Paczynski B. and Rhoads J. E. (1993) *ApJL*, **418**, L5.
95. Katz J. I. (1994) *ApJ*, **422**, 248.
96. Mészáros P. and Rees M. J. (1997) *ApJ*, **476**, 232.
97. Costa E., et al. (1997) *Nature*, **387**, 783.
98. van Paradijs J., et al. (1997) *Nature*, **386**, 686.
99. Frail D. A., Kulkarni S. R., Nicastro L., Feroci M., and Taylor G. B. (1997) *Nature*, **389**, 261.
100. Woosley S. E. (1993) *ApJ*, **405**, 273.
101. Usov V. V. (1992) *Nature*, **357**, 472.
102. Duncan R. C. and Thompson C. (1992) *ApJL*, **392**, L9.
103. Blinnikov S. I., Novikov I. D., Perevodchikova T. V., Polnarev A. G. (1984) *Soviet Astronomy Letters*, **10**, 177.
104. Dai Z., Daigne F., and Mészáros P. (2017) *Space Science Reviews*, **212**, 409.
105. Tursunov A. and Dadhich N. (2019) *Universe*, **5**, 125.
106. Uzdensky D., et al. (2019) arXiv:1903.05328.
107. Rezzolla L. and Zanotti. O. (2013) *Relativistic Hydrodynamics*. Oxford University Press.
108. Piran T. (1999) *Physics Reports*, **314**, 575.
109. Mészáros P. (2002) *AnnRevA&A*, **40**, 137.
110. Kumar P. and Zhang B. (2015) *Physics Reports*, **561**, 1.
111. Willingale R. and Mészáros P. (2017) *Space Science Reviews*, **207**, 63.
112. Beloborodov A. M. and Mészáros P. (2017) *Space Science Reviews*, **207**, 87.
113. Kulkarni, S. R. (2018) *Nature Astronomy*, **2**, 832.
114. Zhang, B. (2018) *The Physics of Gamma-Ray Bursts*, Cambridge University Press.
115. Aimuratov Y. K. (2020) *News of NAS RK. Series of Physics and Mathematics*, Volume 3, Issue 331, P. 21–25.
116. Abbott B. P. et al. (2017) *ApJL*, **848**:L12.
117. Kimura et al. (2016) *Nature*, **529**:54.
118. Pozanenko et al. (2017) *Astronomy & Astrophysics (Caucasus)*, **1**:8.
119. Volnova et al. (2018) *Astronomy & Astrophysics (Caucasus)*, **3**:37.
120. Pozanenko et al. (2018) *ApJL*, **852**:30
121. Pandey et al. (2019) *MNRAS*, **485**:5294.

Аннотация

«Қазақстанның ғарыштық зерттеулері» сериясының 12-томында жақын және алыс ғарыштың өзекті мәселелерін зерттеудегі отандық астрономияның тарихи және соңғы жетістіктері көрсетілген.

Жерге жақын ғарыш кеңістігін кеңінен зерттеу ұсынылған. Геотұрақты аймақты зерттеуде геотұрақты аймақтың зерттеу құралдарының және әдістемелерінің сипаттамасын кұрайды, «KAZSAT 2» және «KAZSAT3» қазақстандық байланыс серіктерінің аумағына мониторинг жүргізілу, жер серіктерінің қауіпті жақындауын талдау, техногендік ластанудың зардаптарын тазарту әдістері ұсынылған.

Жерге жақындайтын объектілерге (ЖЖО) зерттеулер жүргізілген. «Радиастрон» жобасының «Спектр-Р» ғарыш аппаратын оптикалық бақылау және «Спектр-РГ» ресей-германия ғарыштық обсерваторияларына мониторинг жүргізілді.

Күн сәулесінің жарқылының әсерінен жоғары энергиялы гамма-сәулеленудің даму ерекшеліктеріне талдау жасалды, тарихи шолу берілген: «ФАФИ Ай және планеталар зертханасына 50 жыл».

Алыс ғарыш объектілерін зерттеу сейферт ғаламдарын, рентген пульсарларын, қос жұлдыздық жүйелерді, планетарлық тұмандықтарды, гамма-сәулелік жарқылдарын және жұлдыздардың абсолюттік спектрофотометриясы бойынша мәліметтерді талдаудан тұрады.

Сонымен қатар Вайдьидің есептерімен байланысты электромагниттік және корпускулалық сәулелену әсерінен энергияның айнымалы орталық массасы туралы теориялық жұмыс ұсынылған. Қазіргі уақытта В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институтының жас қызметкерлерінің көмегімен астрофизикалық объектілерді сандық модельдеудің заманауи есептеу технологияларын қолдануды дамытуда.

Кітап астрономия және астрофизика саласында жұмыс атқаратын ғалымдар мен мамандарға, сонымен қатар астрономиялық және ғарыштық зерттеулердің дамуына қызығушылық білдіретін университеттердің оқытушылары мен студенттеріне арналған.

Астрономические исследования в Казахстане

Алматы: ТОО «А-ТРИ ПРИНТ», 2020. Том 12 - 378 с.

ISBN 978-601-332-805-8

- К 14** В сборнике серии ««Казахстанские космические исследования» том 12 нашли отражение как исторические, так и недавние достижения отечественной астрономии по исследованию актуальных проблем ближнего и дальнего космоса. Представлено обширное исследование околоземного космического пространства. Исследование геостационарной области включает в себя описание методов и инструментов исследований геостационарной области, мониторинг зоны казахстанских спутников связи «KAZSAT 2» и «KAZSAT 3», анализ опасных сближений спутников, предложены методы очистки последствия техногенного загрязнения. Проведено исследование объектов, сближающихся с Землёй (ОСЗ). Проведено оптическое сопровождение аппарата "Спектр-Р" проекта "Радиоастрон" и мониторинг российско-германской космической обсерватории «Спектр-РГ». Проведён анализ особенностей развития высокоэнергичного гамма-излучения солнечных вспышек, дан исторический обзор: «50 лет лаборатории физики Луны и планет АФИФ». Исследование объектов дальнего космоса представлено анализом данных о сейфертовских галактиках, рентгеновских пульсарах, двойных звездных системах, планетарных туманностях, гамма-всплесках и работой по абсолютной спектрофотометрии звёзд. Представлена также теоретическая работа, связанная с задачей Вайды о переменной центральной массе, теряющей энергию за счёт электромагнитного и корпускулярного излучения. В настоящее время в АФИФ силами молодых сотрудников развивается использование новейших вычислительных технологий для численного моделирования астрофизических объектов.
- Книга рассчитана на учёных и специалистов, работающих в сфере астрономии и астрофизики, а также для преподавателей и студентов университетов, интересующихся развитием астрономических и космических исследований.

Сборник был выпущен в рамках Программно-целевого финансирования BR05336383 Аэрокосмического комитета Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан

**УДК 52
ББК 22.6**

ISBN 978-601-332-805-8

©АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
©ДТОО «АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.Г. ФЕСЕНКОВА»
©ТОО «А-ТРИ Принт», оформление, 2020

Астрономические исследования в Казахстане

Дизайнер: Степанова К.

Компьютерная верстка: Степанова К.

Фото обложки: Бондарь Евгений Анатольевич

Подписано в печать 21.08.2020

Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Уч. изд. печ. л. 18.5

Тираж 300 экз.

Издательство: «А-Три Принт»
г. Алматы, ул. Макатаева 127/3
Тел.: 328-34-88

Типография: «А-Три Принт»
г. Алматы, ул. Макатаева 127/3
Тел.: 328-34-88