

На правах рукописи

ПЛОХОТНИЧЕНКО Владимир Леонидович

**Аппаратура и методы для исследования
оптической переменности астрофизических
объектов с высоким временным
разрешением**

**Специальность 01.03.02 - Астрофизика и звёздная
астрономия**

**АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук**

Санкт-Петербург - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук, САО РАН.

Официальные оппоненты:

Николай Николаевич Киселёв - доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Крымской Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук, Республика Крым, посёлок Научный.

Сергей Анатольевич Левшаков - доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физико-Технического Института имени Иоффе, г. Санкт-Петербург.

Ильфан Фяритович Бикмаев - доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) Федерального Университета, г. Казань.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН)

Защита состоится 9 октября 2020 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) по адресу: 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН и на сайте www.iaaras.ru.

Автореферат разослан “___”_____ 2020г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

Бондаренко Юрий



Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Актуальность темы диссертации определяется существованием широкого класса быстропеременных объектов и явлений. К ним относятся рентгеновские и гамма-барстеры, аккрецирующие и эjectирующие пульсары, переменные и вспыхивающие звезды, а также быстрые радиовсплески, многие из которых были обнаружены в различных диапазонах электромагнитного спектра, в том числе с помощью космических телескопов. Однако для понимания физической природы этих объектов, построения их моделей необходимы наблюдения в оптическом диапазоне с предельно высоким временным разрешением. Впервые эту мысль высказал Викторий Шварцман в контексте поисков наблюдательных проявлений черных дыр звёздных масс (*Шварцман В. Ф., АЖ 1971. N48, С. 479 - 488.*) Под его руководством была начата программа таких исследований (эксперимент МАНИЯ - Многоканальный Анализ Наносекундных Изменений Яркости (*Шварцман В. Ф., Сообщения САО 1977. N19 С. 5 - 48, Царевский, Г. С., Шварцман, В. Ф., Сообщения САО 1977. N19, С. 39 - 57.*)), в рамках которой и выполнена настоящая работа. В пользу её актуальности свидетельствует возникновение в номенклатуре МАС и развитие особых научных областей - астрофизики высокого временного разрешения (High Time Resolution Astrophysics: The Universe at Sub-Second Timescales. AIP Conference Proceedings, Volume 984, 2008.) и астрономии во временной области (Time Domain Astronomy (<http://www.timedomainastronomy.net/>)). Причём в последнее время обозначился базовый принцип такого рода исследований - получение максимума информации о каждом зарегистрированном фотоне. Такой подход и является определяющим в нашей работе.

Степень разработанности темы исследования

Изучение астрофизических процессов в экстремальных условиях высоких напряжённость гравитационных и магнитных полей, предельных плотностей вещества компактных объектов (белых карликов, нейтронных звезд, черных дыр) требует наблюде-

ний с высоким временным разрешением. Вследствие малых размеров областей генерации излучения ($10^5 - 10^8$ см) характерные длительности нестационарных процессов, в них протекающих, составляют $10^{-5} - 10^{-2}$ с, а следовательно, быстродействие регистрирующей аппаратуры должно лежать в субмикросекундном диапазоне. В то же время интенсивность оптического излучения исследуемых объектов достаточно низка (их блеск слабее 17 – 18 зв. вел.), и наблюдения со стандартными фотометрами с апертурными диафрагмами, не позволяют достигнуть оптимальной величины отношения «сигнал - шум» [31]. Для этого необходимо регистрировать потоки квантов, формирующих изображения объектов, а не выделенные диафрагмами, т. е. использовать панорамные детекторы. В силу высокого квантового выхода, начиная с 80-х годов прошлого столетия, такие приёмники - ПЗС-матрицы стали основой любой астрономической аппаратуры. Однако их физические свойства не предполагают использования в наблюдениях с высоким временным разрешением, поскольку в этом случае необходимо регистрировать отдельные фотоны. И даже на самых больших телескопах (диаметром 6–8 м), невозможно наблюдать объекты слабее 14–16 звездной величины с миллисекундным временным разрешением, так как от них за такие промежутки времени поток квантов в пикселях оказывается меньше шума считывания матрицы. ПЗС-матрицы с электронной бомбардировкой (EBCCD) (Suyama M., et al. Proc. SPIE, 2006. 629407 6.) способны регистрировать отдельные фотоны, но их квантовая эффективность, ограниченная чувствительностью фотокатода, как правило, не превышает 50%. ПЗС-матрицы с внутренним усилением (EMCCD) (ANDOR technology, <http://andor.com>) регистрируют отдельные фотоны с очень высокой квантовой эффективностью (> 90%), но последовательное считывание пикселей ограничивает их временное разрешение миллисекундами даже при уменьшении числа элементов в части кадра. Детекторы на основе эффектов сверхпроводимости (STJ, TES) (Perryman M.A.C, et al., A&A 1999. N346, L30-L32., Romani R.W., et al., ApJ, -1999. -N521 -р. 153., Mazin B. A., Meeker S. R. et al., PASP, 2013. N125 Р. 1348.) в принципе имеют высокую квантовую эффективность (до 70%). Однако их предельная скорость счёта часто ограничена

ничиваются значениями несколько тысяч имп/с, при небольшом числе элементов разрешения, а необходимость охлаждения детекторов до сверхнизких температур делает их чрезвычайно дорогими. Лавинопролётные фотодиоды и матрицы на их основе (APD, SPAD, SiFAP) (*Barbieri C., Naletto G. et al.*, *Journ Mod. Optics*. 2009. N56 2-3, P. 261.; *Meddi F., Ambrosino F. et al.*, *PASP*. 2012. N124. P. 448.; *Kapusta M., Crespo P. et al.*, *Nucl. Instr. Met. Phys. Res. A*, 2003. N504. С. 139.) имеют достаточно высокую квантовую эффективность (до 40%) и предельную скорость счета выше 10^6 имп/с, они относительно просты в эксплуатации, но пока также содержат небольшое количество элементов разрешения. Таким образом, в изучении быстропеременных объектов остаётся дилемма: панорамные детекторы не имеют нужного быстродействия, а на основе быстродействующих, но малоканальных детекторов трудно создать многомодовый и многолучевой инструмент. Такое противоречие устраняется при использовании координатно-чувствительных детекторов (КЧД - Position Sensitive Detector, PSD) (*Грунтман М. А., ПТЭ*, 1984, N1, С. 14-29.). Эти вакуумные фотоэлектронные приборы с микроканальным усилением и многоэлементным коллектором, сочетают высокую чувствительность и высокую предельную скорость счета, оставаясь относительно несложными и надежными в работе. Именно на их основе нами были созданы несколько наблюдательных комплексов. Эти инструменты, не имея аналогов в мировой астрофизике, позволяют проводить исследования с высоким временным разрешением, получая максимум информации (спектральной, фотометрической, поляризационной) о каждом зарегистрированном фотоне. Таким образом, именно наши результаты в области создания и использования в наблюдениях аппаратуры и методов высокого временного разрешения определяют высокую степень разработанности этой темы в современной астрономии.

Цели работы

Основной целью данной работы является развитие методов и аппаратуры для поиска и исследования оптической переменности астрофизических объектов с временным разрешением вплоть до

микросекунд. Эта цель может быть разделена на следующие:

1. реализовать высокую точность при определении моментов регистрации отдельных фотонов с привязкой к мировому времени в сочетании с высоким быстродействием светоприёмной аппаратуры;
2. обеспечить синхронное получение максимума информации (координатной, спектральной, поляризационной) о каждом зарегистрированном кванте излучения;
3. создать возможности накопления и сохранения больших объёмов потоков данных высокой интенсивности, а также их детального статистического анализа для определения физических характеристик и построения моделей исследуемых объектов и явлений.

Задачи исследования

- Развитие хронометрических методов, позволяющих регистрировать времена прихода отдельных квантов с высокоточной привязкой к мировому времени.
- Создание и внедрение в наблюдения фотоприёмных устройств на базе координатно-чувствительных детекторов высокого временного разрешения.
- Создание серии фотополяриметров, позволяющих проводить наблюдения в различных фотометрических, поляризационных и спектральных модах, сменяемых в дистанционном режиме.
- Создание программно-алгоритмических комплексов приёма и обработки последовательностей зарегистрированных фотонов.

Научная новизна работы состоит в следующем

1. Впервые программно реализован и введён в практику астрономических исследований метод интервального анализа

для обнаружения и определения параметров переменности потоков дискретных событий.

2. Развит способ поиска и определения характеристик периодического сигнала путём цифрового синхронного детектирования в применении к исследованию переменных астрофизических объектов в оптическом диапазоне.
3. Впервые развит и введён в практику астрономических наблюдений комплекс методов многомерной хронометрии потоков фотонов с использованием детекторов на счёте фотонов различного типа.
4. Создан комплект навесного оборудования для 6-м телескопа на базе координатно-чувствительных детекторов различных типов, реализующий метод многомерной хронометрии. Наблюдения с этой аппаратурой позволяют исследовать переменность астрофизических объектов с микросекундным временным разрешением, синхронно определяя при этом её фотометрические, поляризационные и спектральные характеристики.

В настоящее время в мире отсутствуют аналоги упомянутых комплексов.

Созданный аппаратно-методический комплекс используется в наблюдениях на 6-метровом телескопе САО РАН с высоким временным разрешением для поиска и исследования объектов плохо определённой локализации по данным радио, рентгеновских и гамма телескопов согласно заявкам российских и иностранных учёных.

Научная и практическая значимость работы

В рамках выполненной работы решена важная научно-техническая проблема разработки, создания и внедрения в астрономические исследования комплекса аппаратуры и методов для изучения астрофизических объектов и явлений с предельно высоким временным разрешением вплоть до 1 мкс при сопутствующем

определении их различных характеристик. В процессе создания приборы и методы на протяжении более 40 лет использовались в наблюдениях на 6–метровом телескопе.

Реализованы в аппаратурном исполнении методы регистрации моментов прихода отдельных фотонов в сопровождении их дополнительных характеристик, пространственных, энергетических и поляризационных, применявшиеся в исследованиях астрофизических объектов разных типов. Разработаны и использованы на практике программно-алгоритмические средства анализа многомерных массивов фотонных событий с помощью компьютеров разных поколений.

Созданные автором приборы, разработанные им методы анализа данных наблюдений, были использованы в многолетних исследованиях переменных объектов на 6–метровом телескопе САО РАН. В частности, изучены характеристики множества вспышек красных карликов, получены сфазированные кривые блеска пульсара в Крабе с наилучшим в мире временным разрешением и исследованы их особенности, по результатам поиска переменности у нескольких десятков кандидатов в чёрные дыры, установлены ограничения на плотность ЧД в окрестностях Солнца, у нескольких рентгеновских источников обнаружена тонкая структура вариаций их оптического блеска на временах от миллисекунд до секунд, установлены ограничения на степень линейной поляризации у нескольких десятков вспышек красных карликов и обнаружены высокополяризованные субсекундные спайки в гигантской вспышке звезды UV Ceti, одновременно в двух спектральных диапазонах было обнаружено пульсирующее излучение пульсара PSR J1023+0038 с периодом 1.69 мс. Полученные результаты доказывают эффективность созданных автором аппаратуры и методов для наблюдений с высоким времененным разрешением. Они могут использоваться в астрономических исследованиях САО РАН, ИНАСАН, ГАО РАН, КФУ, ГАИШ МГУ, КрАО, ИКИ, а также других институтов, российских и иностранных.

Методологическая и теоретическая основа исследований

При решении поставленных задач использованы методы численно-аналитического, статистического (Монте-Карло) и физического моделирования (лабораторные исследования постоянных и переменных источников света), в наблюдениях реальных астрофизических объектов (с периодическими и стохастическими вариациями блеска) использовался аппарат теории вероятностей и математической статистики. Учитывались особенности физических механизмов, лежащих в основе функционирования координатно-чувствительных детекторов, закономерности электронной оптики и принципы оптимального построения оптических систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработка методов оптимального определения характеристик потоков фотонов, зарегистрированных в наблюдениях с высоким временным разрешением.
2. Изобретение конструкции (способа и устройства) системы многомерного хронометрирования потоков дискретных событий (Патент № 2012027).
3. Создание трех поколениях хронометрических систем Квантохрон 3-8, 3-16 и 4-48, а также разработка новой совершенной версии таких приборов.
4. Оптимизация режимов функционирования фотоприёмных устройств, построенных на базе координатно-чувствительных детекторов с фотокатодами и анодами различных типов, по результатам исследования их особенностей и внедрение в практику наблюдений.
5. Разработка, создание и внедрение в наблюдения нескольких поколений панорамных фотополяриметров высокого временного разрешения, использующих координатно-чувствительные детекторы разных типов.

6. Разработка и введение в эксплуатацию аппаратурно-программного комплекса высокого временного разрешения, технико-методическое обеспечение проведения наблюдений с его использованием и получение наблюдательных данных в многолетних исследованиях на 6-метровом телескопе объектов различных типов - рентгеновских источников, вспыхивающих звезд, кандидатов в черные дыры, пульсаров и гамма-всплесков.

Апробация работы

Описанные в диссертации аппаратура и методы исследований протестированы как в лаборатории, так и в многочисленных наблюдениях на 6-метровом телескопе стационарных и изменяющихся блеск (стохастически и периодически) источников излучения, проведённых как сотрудниками САО РАН, так и в рамках программ внешних заявителей.

Достоверность полученных результатов наблюдений подтверждается повторяющимися многократными измерениями, сравнением с данными численного моделирования и итогами исследований переменных объектов, опубликованными другими авторами.

Результаты работы апробированы в докладах на научных семинарах, конференциях и учёных советах САО РАН, а также на 32 Всесоюзных, Всероссийских и международных совещаниях, конференциях, коллоквиумах и симпозиумах:

9th International Conference on General Relativity and Gravitation, July 14-19, 1980, Jena, G.D.R.. Современные теоретические и экспериментальные проблемы теории относительности и гравитации, 5-ая Советская гравитационная конференция, Москва, МГУ, июнь 1981. Международный симпозиум по вспыхивающим звездам (Бюракан, 1984). I.A.U Colloquim no 104, 15-19 August 1988, Stanford University, California, USA, Solar and Stellar Flares: - High time resolution photometry of red dwarf flare stars. Международная конференции «Физика нейтронных звезд», Ленинград 1988. Симпозиум MAC N165 (Нидерланды, Гаага, 1994). Международная конференция «Космоп-94» (Москва, 1994). Конференция «The Evolution of X-ray Binaries» (Мериленд, США, 1994).

XXII IAU General Assembly, Holland, 1994. Пятая конференция ADASS (Таксон, США, 1995). Коллоквиум МАС N158 (Англия, Киль, 1995). 7-е Межрегиональное Азиатско-Тихоокеанское совещание (Южная Корея, Пусан, 1996). Коллоквиум МАС N161 (Италия, Капри, 1996). Meeting «Cosmion' 94» France, 1996. IV Russian Astronomical Society Meeting, Moscow, 1998. Девятнадцатый Техасский симпозиум по релятивистской астрофизике и космологии (Франция, Париж, 1998). Всероссийская конференция «Астрофизика на рубеже веков», Пущино, 1999. Коллоквиум Физика нейтронных звёзд. С-Петербург, Россия, 25-26 мая 1999. JENAM 2000, Moscow, May 29-June 3, 2000. Конференция «Астрономия гамма-всплесков и послесвечений 2001» (США, Вудс Холл, 2001). Всероссийская астрономическая конференция, Санкт-Петербург, 6-12 авг. 2001. 6й симпозиум по КЧД (Великобритания, Ланчестер, NIM 2003). ВАК-2004 «Горизонты вселенной», Москва, 2004. 7th Russian Conference on Physics of Neutron Stars, Санкт Петербург, 2005. Конференция «Астрофизика высокого временного разрешения» (Англия, Эдинбург, 2007). IAU Symposium 238, aug. 14-25 2006, Prague, Czech Rep. Black Holes from Stars to Galaxies. Конференции SPIE (Франция, Марсель, 2008; США, Сан Диего, 2010). Всероссийская астрофизическая конференция. От эпохи Галлилея до наших дней, (Россия, Нижний Архыз, 12-19 сент. 2010). Stars: From Collapse to Collapse, 3-7 октября 2016 года, пос. Нижний Архыз, КЧР, САО РАН. Conference on Physics of Neutron Stars, Санкт Петербург, 2017. Международная конференция Сверхновая SN 1987A, квартовый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия, 2 - 8 июля 2017 г. КБР, Терскол (БНО), КЧР, Нижний Архыз (САО). Международная конференция: Астрономия быстрого реагирования: гамма-всплески, электромагнитное отождествление нейтринных событий и источников гравитационных волн, 7-14 октября 2018 г. Нижний Архыз (САО) и Терскол (БНО).

Личный вклад автора в публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 38 работах в изданиях перечня ВАК, из которых 37 работы написаны совместно с другими авторами. Они также отражены в 36 статьях, тезисах и других материалах научных конференций. По теме диссертации получен Патент Российской Федерации на изобретение многоканального хронометрического устройства КвантоХрон. Технические аспекты разработок представлены в 9 научно-технических отчётах САО РАН, подготовленных с соавторами, общим объёмом около 500 страниц, большая часть которых написана автором.

Описанные в диссертации программные и аппаратные разработки основаны на идеях автора и реализованы им лично или под его руководством. Автор внедрил ряд ФПУ на основе КЧД, а также разработанные под его руководством приборы и методы в астрономическую практику и на протяжении 20 лет регулярно обеспечивал их функционирование в наблюдениях.

Автор создал аппаратуру и программное обеспечение для приёма данных, что отражено в публикациях [12, 16, 23, 29, 30, 31, 33, 37], чьи тексты написаны преимущественно автором. Методико-технологическое обеспечение наладки детекторов, оптимизации режимов их функционирования и внедрение в наблюдения выполнено автором и описано им же в работах [22, 28, 26, 32]. Получение и обработка наблюдательных данных с использованием авторских программ описаны им в работах [1-10]. Получение наблюдательных данных с использованием аппаратуры, созданной автором, их обработка его программами и алгоритмами, описаны им в работах [11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 24]. Процессы подготовки, оптимизации режимов функционирования и проведения наблюдений с помощью аппаратуры, созданной автором, изложены им в работах [25, 27, 34, 35, 36].

Автору принадлежит идея создания многоканального времязиммерительного устройства КвантоХрон [39], защищённого патентом N 2012027. Под его руководством выполнялись проектирование и наладка этого прибора, как и всех его последующих мо-

делей. Описанный в работе [38] эскизный проект хронометрического граббера потоков стохастических событий предполагается использовать в дальнейшем развитии методов исследования характеристик потоков фотонов, регистрируемых панорамными детекторами с высоким временным разрешением.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Общий объем диссертации составляет 334 страниц, 164 рисунка, 14 таблиц. Содержит 106 ссылок на литературу.

Содержание диссертации

Во **Введении** обосновывается актуальность проблемы, формулируется цель работы, отмечаются ее научная новизна и практическая значимость. Выделен личный вклад автора, перечислены конференции, на которых состоялась апробация отдельных этапов работы, и представленные там доклады и материалы, перечислены публикации по теме диссертации, а также результаты, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена изложению методов поиска и анализа стохастической и периодической переменности излучения астрономических объектов. Описываются оптимальные алгоритмы получения выборочных оценок y_2 - и d_2 - функций, используемых для обнаружения и определения характеристик переменной компоненты излучения, предложенных В. Ф. Шварцманом (*Шварцман, В. Ф., Сообщения САО -1977. -N19 - С. 5.*). Приводятся методы их статистического анализа и определения параметров переменного на временной шкале от секунд до микросекунд сигнала, численно-аналитического моделирования этих функций для стохастического и периодически модулированного потока квантов. Описываются алгоритмы цифрового синхронного детектирования для поиска периодического излучения и построения его кривой блеска с высоким временным разрешением

при низкой точности периода, а также построения и статистического анализа структуры кривых блеска вспышек красных карликовых звёзд.

Метод y_2 -функций основан на исследовании статистической значимости отклонений распределений длительности интервалов времени между зарегистрированными квантами от таковых у эталонного временного ряда (модельного, либо накопленного от контрольного источника) (Мансуров В. Н., Шварцман В. Ф., Сообщения САО. 1977, N19. С. 52.):

$y_2(\tau_k) = \frac{P(\tau_k)}{P^o(\tau_k)} - 1$, где $P(\tau_k) = \int_{\tau_k}^{2\tau_k} f_2(t)dt$ - вероятность появления интервалов между фотоотсчёты от исследуемого объекта, длительности которых попадают в промежуток от τ_k до $2\tau_k$, где τ_k охватывают диапазон всех возможных длин интервалов в потоке событий. $P^o(\tau_k)$ - аналогичная вероятность в нормировочном потоке. Оценить доли интервалов разных длительностей можно по гистограмме: $h(\tau_k, T) = \frac{N(\tau_k, T)}{\sum N(\tau_k, T)}$. Здесь $N(\tau_k, T)$ - количество интервалов длительностью от τ_k до $2\tau_k$ между соседними фотоотсчёты, накопленных за время T , $N(T)$ - полное количество интервалов. При отсутствии аппаратных искажений вероятность $P(\tau_k) = \lim_{T \rightarrow \infty} h(\tau_k, T)$.

Метод d_2 -функций является вариантом дисперсионного анализа при поиске переменности в диапазоне времён от среднего интервала между квантами до полной длительности накопления выборки. Его основа - сравнения дисперсий кривых блеска изучаемых и контрольных объектов. d_2 -функцию В. Шварцман ввёл в следующем виде: $d_2(\tau_k) = \frac{D(n_k(t))}{M^2(n_k(t))} - \frac{D(n_k^0(t))}{M^2(n_k^0(t))}$, где $n_k(t)$ - количество отсчётов исследуемого потока в окне длительностью τ_k в момент времени t , $D(n_k(t))$ - дисперсия, а $M(n_k(t))$ - математическое ожидание величины $n_k(t)$, $D(n_k^0(t))$ - дисперсия кривой блеска опорного потока, либо распределения Пуассона с параметром $\lambda = M(n_k^0(t))$, т.е. $D(n_k) = M(n_k(t))$ и $D(n_k^0) = M(n_k^0(t))$.

Эти функции связаны простыми соотношениями со спектрами мощности и корреляционными функциями анализируемых потоков квантов. Если представить переменную с характерным временем $\tau_{\text{всп}}$ интенсивность потока регистрируемых квантов в виде $I(t) = \langle I \rangle (1 + Z(t))$, где $\langle I \rangle$ - средняя интенсивность за

время их накопления, так что $\langle Z \rangle = 0$, то: $\lim_{u,v \rightarrow 0} y_2(\tau) = \lim_{u \rightarrow 0} d_2(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T Z(\alpha)Z(\alpha + \tau)d\alpha$, где $u = \frac{\tau}{\tau_{всп}}$, $v = \frac{\tau}{\langle \tau \rangle}$ (Шварцман В. Ф., Сообщения САО 1977. N19 С. 5 – 38.), [41], а значит, оба метода асимптотически совпадают и могут быть использованы как дополняющие в различных диапазонах при поиске переменности от микросекунд до длительностей экспозиций. Оценка верхних пределов на мощность переменной компоненты выполняется после отверждения гипотезы об обнаружении переменности в массиве данных объекта:

$\langle s(\tau_k, T) \rangle \leq \frac{\langle I^{об} \rangle + \langle I^{фон} \rangle}{\langle I^{об} \rangle} \sqrt{\frac{\langle \beta \rangle}{\langle k_{\phi} \rangle} \psi S^2(\Phi_2^*(\tau_k, T))}$, где первый сомножитель учитывает тот факт, что поток фотоотсчётов от объекта $\langle I^{об} \rangle$ включает в себя фоновое излучение неба $\langle I^{фон} \rangle$, попадающее в диафрагму фотометра, $S^2(\Phi_2^*(\tau_k, T))$ – выборочная дисперсия контрольных y_2 - и d_2 -функций переменности от средних значений на временных интервалах τ_k [1, 24, 41].

Результаты численно-аналитического расчёта этих функций в случае прямоугольно-импульсного модулирования интенсивностей стохастических потоков показаны на Рисунке 1, алгоритм которого для различных типов переменных сигналов также обсуждается в данной главе.

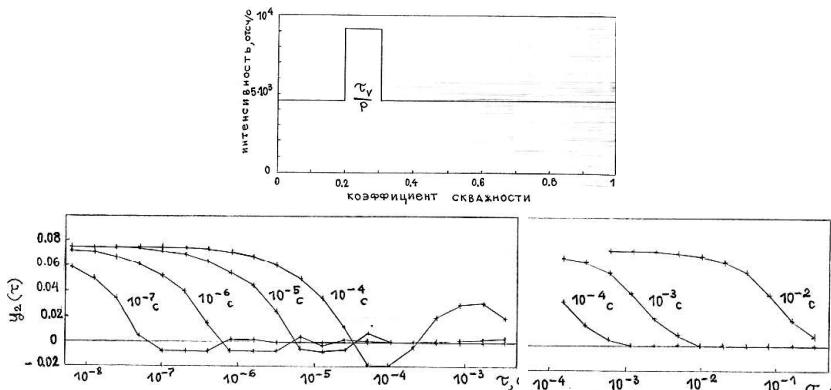


Рис. 1. Зависимость y_2 - и d_2 -функций от длительности τ_{var} вспышки прямоугольной формы при коэффициенте скважности 0.1 и средней интенсивности потока квантов $\lambda = 5000$ отсч./сек.

Упомянутые методы использованы при поиске переменности мягкого репитора SGR 1806-20. Они позволили ограничить её не уровне $23^m - 24^m$ [24].

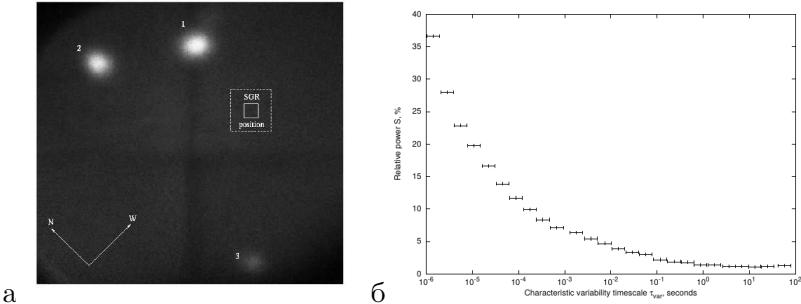


Рис. 2. а - область локализации объекта SGR 1806-20, на панорамной системе регистрации фотонов, описанной в главах 3 и 4, где цифрами 1, 2 и 3 отмечены опорные звёзды, б - верхняя граница для мощности переменной составляющей излучения (под ней зона нечувствительности). На временах 10^{-4} с импульсное излучение было бы обнаружено, если бы доля квантов в этих импульсах превышала бы 10% общего потока в 150 квантов/сек.

Также в этой главе описываются методы цифрового синхронного детектирования при поиске оптимального периода вариаций оптического излучения. Под синхронным детектированием понимается свёртка наблюдаемого процесса с периодом повторения сигнала, содержащегося в нём. Цифровое синхронное детектирование (ЦСД) в астрофизике предполагает выполнение этой операции по ранее полученным наблюдательным данным - кривым зависимости интенсивности излучения от времени, накопленным, в частности, от радиопульсаров. В оптическом диапазоне - по моментам времён детектирования квантов требуется суммировать их на длине периода повторения сигнала, используя формулу $i = \{\varphi(t_j)\}N$, где $\varphi(t_j)$ – фаза момента времени t прихода отсчё-

та j при периоде P_0 , $\{\}$ – дробная часть числа, N – количество окон, на которые разбивается период P_0 . Фазу периодического процесса, соответствующую моменту t_j регистрации j -го фотона, можно представить в виде: $\varphi(t_j) = \varphi_0 + \frac{1}{2\pi} \int_{t_0}^{t_j} \Omega(t') dt'$, где φ_0 – фаза этого фотона в периодическом процессе в момент t_0 , $\Omega(t) = 2\pi/P(t)$ – циклическая частота процесса.

В работе рассматриваются два метода поиска периода, основанные на ЦСД.

Первый применяется в широком диапазоне возможных значений искомого периода P_0 с перебором большого количества его пробных значений P , при выполнении сворачивания кривых блеска с этими периодами P в подвыборках на коротких временных отрезках ΔT_i , где «размывание» по фазе ещё не приводит к исчезновению пульсов в случае даже значительного несовпадения пробного и реального периодов. Перед сложением всех отсчётов в выборках выполняются циклические сдвиги кривых блеска подвыборок, компенсирующие расхождения фаз пульсов в результате несовпадения периодов. Затем из ряда полученных суммарных кривых $L(P_i)$ выбирается кривая $L(P_b)$ с наилучшим соотношением сигнал/шум, период P_b которой будет близок к искомому P_0 . Образец тестового применения этого метода к данным, полученным при наблюдениях пульсара в Крабе на БТА показан на Рисунке 3, I. Предлагаемый метод даёт ускорение счёта на три порядка по сравнению с прямыми фазированием исходного ряда по такому же количеству периодов, что существенно и для современных компьютеров. Уровень обнаружения периода зависит только от доли квантов в переменной составляющей, а не от его величины [54].

Второй вариант метода ЦСД используется для уточнения величины периода путём поиска методом наименьших квадратов минимума функции суммы квадратов разностей кривых с различными фазовыми сдвигами, определяющимися уходом фазы пульса, вызванным неточностью выбора пробного периода ΔP и разнесением во времени T анализируемых выборок. Получив зависимость $\varphi(T)$ можно измерить P_0 , \dot{P}_0 и \ddot{P}_0 . Такой учёт фаз при суммированию моментов времени регистрации квантов позволил

получить кривую блеска пульсара в Крабовидной Туманности с предельным времененным разрешением (Рисунок 3 II). Также были получены и его кривые блеска в различных фотометрических полосах (Рисунок 18 I).

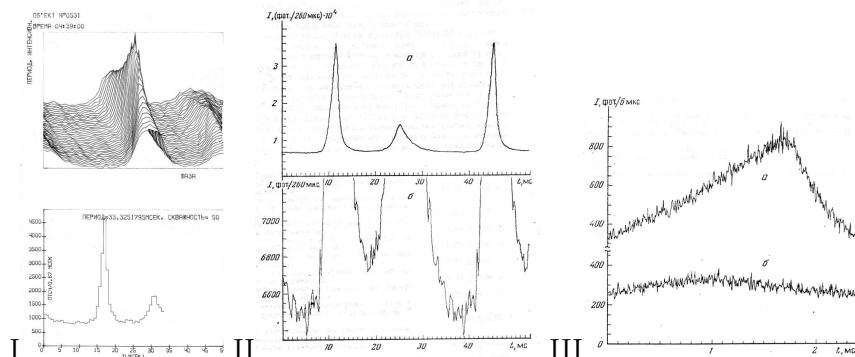


Рис. 3. I - Сфазированные методом ЦСД кривые кривых блеска пульсара в Крабовидной Туманности с различными значениями полученного набора пробных периодов вблизи наиболее подходящего, и кривая блеска с лучшим периодом (внизу). II - Общий вид кривой блеска пульсара PSR0531+21, полученной вторым методом ЦСД из наблюдательных данных 15/16 февраля 1980 г. в фильтре R (а) и фрагмент той же кривой блеска, иллюстрирующий межпульсное пространство (б). Временное разрешение 260 μ s. III - Фрагменты главного - а и вторичного - б пульсов, вычисленные с окном 6 мкс [4].

Приводятся алгоритмы построения кривых блеска и их статистического анализа для исследования вспыхивающих звёзд и других нестационарных объектов на субсекундных временах, а также обсуждается моделирование выборочных распределений интервалов между квантами в потоках излучения методом Монте-Карло.

Описанные методы анализа свойств потоков излучения наблюдаемых объектов применяются в качестве основного инструмента для проведения поиска быстрой стохастической переменности у кандидатов в чёрные дыры звёздных масс и ряда рентгеновских двойных систем, поиска и исследования пульсаров, а

также при изучении активности вспыхивающих звёзд, что нашло отражение в работах [7, 8, 9, 34, 42, 45, 46, 47, 75] и в главе 5.

Во второй главе описываются принципы создания и варианты конструкций многомерных хронометрических систем для регистрации потоков квантов с высоким временным разрешением. Эти приборы используются в наблюдениях на БТА на протяжении 30 лет (с 1989 г.). Первым устройством, созданным для таких наблюдений в САО АН СССР (1972–73гг.), был ПВКА - преобразователь время-код-амплитуда (Демчук, М. И.; Евсеев, О. А. и др. Сообщения САО. 1977, №20. С. 5.), затем был сконструирован стробируемый индикатор реального времени - СТИРВ (Пимонов А. А., Сообщения САО 1979, вып. 25, С. 31-38.). Эти приборы позволили получить результаты, описанные в работах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], с помощью методов, изложенных ранее. В этой главе приведены функциональные блок-схемы хронометрических устройств нескольких поколений «КвантоХрон 3-8», «КвантоХрон 3-16» [12, 39] и «КвантоХрон 4-48» [30], которые основаны на нониусном принципе измерения времени и отличаются способами определения моментов регистрации фотонов. Предлагается также проект нового устройства «КвантоХрон 5-48» - многомерного хронометрического граббера потоков фотоотсчётов, зарегистрированных координатно-чувствительными детекторами различных типов.

Хронометрическое устройство «КвантоХрон 3-16» разработано в стандарте КАМАК. Оно содержит две линейки оперативной памяти размера 16×16 бит, которые поочередно подключаются к приёму данных тактовыми синхроимпульсами частоты 10 КГц (или 25 КГц), приходящими от сервера времени и нумеруемыми самим устройством как старшие разряды отчётов времени. Эти отсчёты (12 разрядов) вместе с показаниями счётчиков пришедших квантов (4 разряда) записываются в нулевые ячейки линеек памяти (Рисунок 4б). Результаты измерений младших (нониусных) 16-ти разрядов кода времени прихода отсчётов от детектора фотонов записываются по адресам, соответствующим номерам квантов, пришедших от начала такта.

Синхронно с ними фиксируются коды координат зарегистрированных квантов. Для этого используются два набора по 16 входных 16-разрядных регистров. После окончания очередного такта измерений включается другая линейка, а информация из первой может быть прочитана компьютером. В каждом такте может быть зарегистрировано до 15 нониусных отсчётов времени прихода квантов и их 16-разрядных координат. Это устройство может принимать данные от детектора фотонов без потерь на протяжении субсекундных экспозиций под управлением драйвера, установленного в ядре операционной системы и работающего с запретом ВСЕХ прерываний процессора в течение экспозиции. Минимальный интервал между регистрируемыми событиями – 20 нс. Предельный средний темп регистрации потоков, обеспечиваемый КАМАК-PC-контроллером, разработанным нами, составляет 375000 16-разрядных отсчётов/с (при тактовой частоте 25 КГц) вместо 75000 отсч./с при использовании стандартного КАМАК-PC-контроллера.

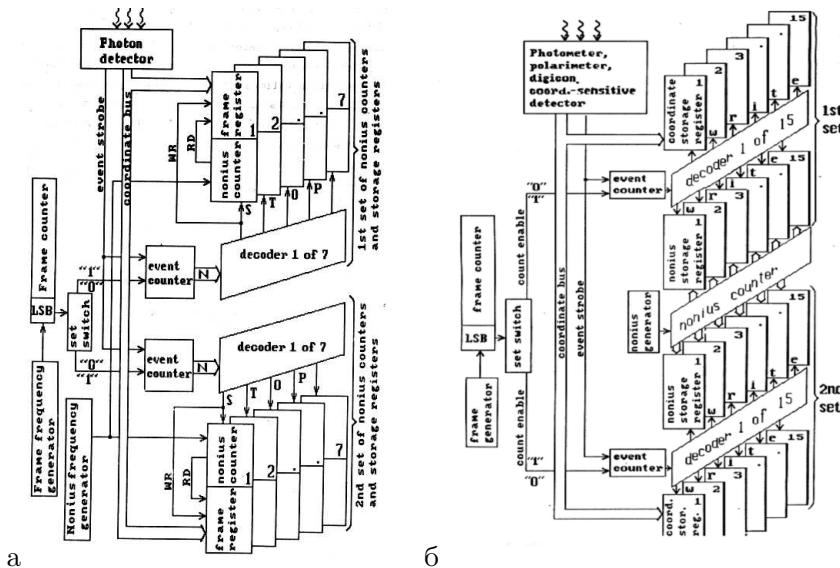


Рис. 4. Блок схемы приборов «КвантоХрон 3-8» и «КвантоХрон 3-16». Устройства разработаны совместно с А.В. Журавковым.

Состав применяемых детекторов и структура программного комплекса для работы с устройством многомерной хронометрии потоков квантов, возможности применения для работы с детекторами квантов различных типов и решения широкого круга астрофизических задач, связанных с исследованиями переменных объектов в диапазоне времён от микросекунд до минут описаны в работах [13, 16, 18, 19, 55, 58, 59, 60]. Созданные системы регистрации применялись в плановых наблюдениях на БТА САО РАН с 1989 по 2004 г. при использовании фотометров (*Неизвестный С. И., Пимонов А. А., Сообщения Спец. астрофизич. обсерватории. 1978 вып. 23. С. 56 - 67.*). Их результаты описаны в работах [11, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 64, 66]. После появления работоспособных координатно-чувствительных детекторов (КЧД) с помощью «КвантоХрона 3-16» проводилась наладка фотоприёмных устройств (ФПУ), созданных на их основе, и фотополяриметра, их использующего, а также первые наблюдения с этими приборами [22, 23, 24, 65, 66, 67].

Более совершенная система была создана на основе двух одноплатных многомерных хронометрических устройств «КвантоХрон 4-48», установленных в двух компьютерах типа Pentium 2 и включенных в 3-компьютерный кластер [30]. Он обеспечивает непрерывный приём кодов фотонов, встраиваемых в поток синхроотсчётов с частотой 10 КГц и накапливаемый хронометрическими устройствами по очереди с секундными экспозициями. Третий компьютер управляет очерёдностью их включения, сохраняя в своей долговременной памяти массивы, полученные в предыдущей экспозиции одним из компьютеров в то время, как новые массивы принимает другой. Функциональная схема и внешний вид платы прибора «КвантоХрон 4-48» показаны на Рисунке 5.

Время прихода фотона определяется по формуле: $t = UTC_{[s]} + 10^{-4} \cdot T + s \cdot N$, где $UTC_{[s]}$ — номер секунды, полученный от сервера времени по межкомпьютерной сети перед началом экспозиции, T — количество 10 КГц импульсов, пришедших от начала секунды, s — интервал между тактовыми PCI-импульсами. $s \sim 3 \cdot 10^{-8}$, его точное значение определяется для каждого конкретного компьютера сравнением PCI-частоты с эталонной. Размерность отсчётов $t = [c]$. Полуширина рассеяния моментов прихода импульсов от

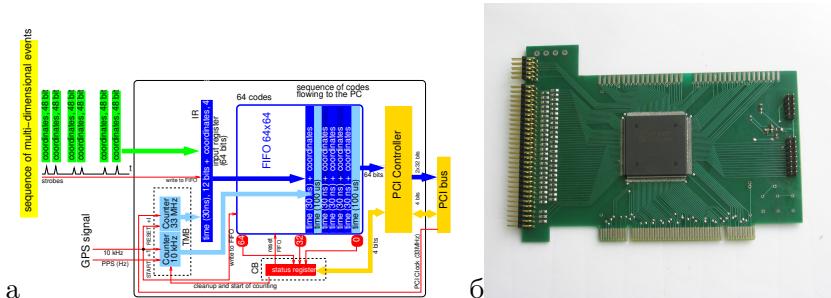


Рис. 5. Функциональная схема Квантохрона 4-48 и его PCI-плата. Устройство разработано совместно с А.В. Солиным и А.Г. Тихоновым, НЦФЧВЭ, Минск.

стандартного генератора равна 30 нс (см. Рисунок 6 I)

Основные характеристики «Квантохрона 4-48»: - локальная точность измерения момента регистрации фотона - 30 нс; - мёртвое время системы - 30 нс; - предельный поток, регистрируемый без потерь, -10^6 фотоотсчёт/сек; - разрядность принимаемых сигналов - 48, что соответствует полю координат -2^{48} .

Также на Рисунке 6 II показано распределение интервалов между фотоотсчётаами, накопленными от фотоприёмного устройства с GaAs координатно-чувствительного детектора, описанного в главе 3, которое с высокой точностью соответствует теоретически ожидаемому, см. гл. 1. Графики иллюстрируют эффективность использования Квантохрона при измерении временных характеристик слабых световых потоков и соответствие потока отсчётов от GaAs КЧД (см. 3 главу) выбранной математической модели потока случайных событий.

Система позволяет проводить накопление кодов фотонов, регистрируемых детекторами на протяжении времени, ограниченном только размерами доступной памяти хранилища данных и временем суток. После выполнения экспозиций наблюдательные данные могут быть обработаны методами, соответствующими решаемой в наблюдениях задаче и предполагающими анализ временных рядов с высоким разрешением и высокоточной привязкой к мировому времени. Это позволяет анализировать потоки

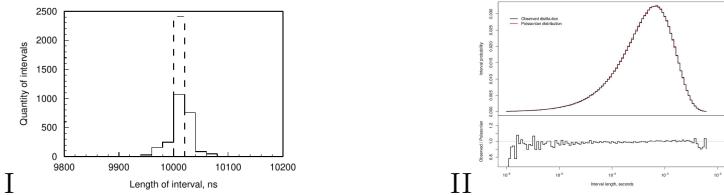


Рис. 6. I - Гистограмма распределения интервалов между зарегистрированными импульсами частоты 100 КГц. Пунктиром показан ее вид при идеальной работе Квантохрона. II - Распределение длин интервалов между квантами, зарегистрированными на GaAs КЧД, описанным в Главе 3, при постоянной и равномерной засветке катода, в сравнении с распределением интервалов в потоке случайных событий такой же постоянной интенсивности. На нижнем графике приводится разность распределений, нормированная на теоретическое.

дных в физическом времени, выполняя необходимые коррекции, например, учёт Доплер-эффекта, и вести синхронные наблюдения с другими инструментами, используя детекторы квантов разных типов, с применением к полученным данным методов анализа, изложенных в главе 1, а также развивающихся дополнительно, перенося часть особенностей конструирования аппаратурных устройств в алгоритмическую область.

Во второй главе также описывается проект системы регистрации пятого поколения - многомерного хронометрического граббера «Квантохрон 5-48» [38], предназначенного для приёма информации от различных панорамных детекторов фотонов. В нём развиваются проверенные практикой многолетних наблюдений принципы многомерной хронометрии, реализованные в системах «Квантохрон 3-16» и «Квантохрон 4-48». Особенность заключается в организации дополнительного (надстроичного) функционального узла, обеспечивающего автономный на протяжении секунды приём информации в многостраничную буферную память, переключаемую тактовыми синхроимпульсами от сервера времени. Благодаря такой конструкции можно выполнять непрерывное на протяжении длительного времени получение данных от детекторов на одном компьютере в режиме простой пользовательской

задачи, без использования драйвера в ядре системы. Функциональная схема устройства показана на Рисунке 7.

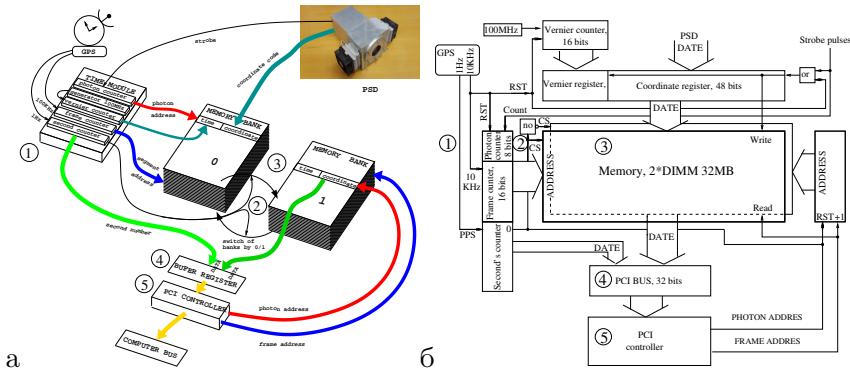


Рис. 7. а - блок-схема хронометрического устройства «КвантоХрон 5-48»; б - его функциональная схема. На них: 1 - блок измерения времени и переключения потоков информации, 2 - переключатель банков памяти, 3 - два банка памяти, 4 - выходной буферный регистр. 5 - контроллер передачи данных. PSD (Position Sensitive Detector) - многоканальный детектор квантов.

Пиковое быстродействие этого граббера определяется скоростью функционирования используемой буферной памяти и может доходить до 10^8 кодов/с при средней скорости регистрации в миллионы кодов/с, определяемой загрузочной способностью шин передачи данных.

В отличие от устройства с FIFO памятью, в предлагаемом граббере процессы приёма и сохранения данных не конкурируют, а все факты превышения скорости приёма данных над максимальными для их сохранения будут зафиксированы в самой структуре данных, что повысит достоверность получаемой информации.

В третьей главе описывается внедрение фотоприёмных устройств (ФПУ) на основе координатно-чувствительных детекторов фотонов (КЧД) различных типов в практику наблюдений на 6- метровом телескопе САО РАН. Рассматриваются некото-

рые типы панорамных детекторов фотонов с микроканальным усилением фототока и создаваемых на их основе фотоприёмных устройств. Формулируются требования к характеристикам таких приборов, позволяющие использовать их для астрономических наблюдений с высоким временным разрешением, приводятся описания этих устройств, а также процедуры их настройки, программных исправлений координатного поля и измерения рабочих характеристик.

Первым КЧД, использующимся в наблюдениях на БТА, был детектор с фотокатодом S20 на оптоволоконном входном окне, усилением фототока в $20 \cdot 10^6$ раз набором из трёх микроканальных пластинах (МКП) и клинополосным анодом для определения координат центроидов лавин. С его помощью отрабатывались аппаратурно-методические приёмы использования панорамных приёмников, завершившиеся их внедрением в программные наблюдения на БТА. Конструкция и внешний вид детектора показаны на Рисунке 8. ФПУ на его основе было собрано В. Г. дe-Буром из стандартных КАМАК-модулей, усилителей, аналогоцифровых преобразователей и дискриминатора. В КЧД, электрон, покинувший фотокатод под действием кванта, порождает электронную лавину в микроканальных пластинах, которая поступает на коллектор. По величинам импульсов зарядов на выходах электродов коллектора можно определить координаты центроида этой лавины по формулам: $X = Qx / \sum Q$ и $Y = Qy / \sum Q$, где Qx – заряд, регистрируемый на электроде S (внизу Рис.8 в), Qy – на электроде W (сверху того же рисунка), а $\sum Q$ – суммарный заряд лавины (боковые электроды).

После усиления лавин и их оцифровки полученные отсчёты регистрировались хронометрическим устройством «КвантоХрон 3-16», описанным во второй главе. Для согласования форматов данных использовался мультиплексор, преобразующий 24-разрядный код КЧД в пакет из двух кодов, из 16-и и 8-и разрядов. Начальная версия программного обеспечения строилась на основе программы приёма данных в МАМА-камере (O'Sullivan, C.; Shearer, A., et al., A&A J. 1998. N335 P. 991-994., Redfern M.; Shearer, A. et al., Gemini Newsletter. 1992. N38. P.1.).

Основные характеристики КЧД: диаметр чувствительной по-

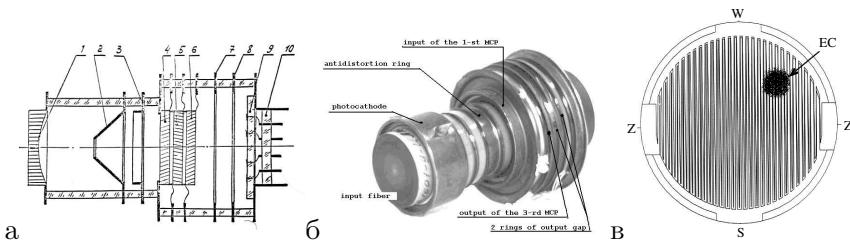


Рис. 8. а - схема КЧД. 1 - фотокатод на волоконном диске, 2 - анод, 3 - антидисторсионный электрод, 4 - первая МКП, 5 - вторая МКП, 6 - третья МКП, 7 - первое кольцо, 8 - второе кольцо, 9 - коллектор, 10 - ножка с выводами. б - внешний вид КЧД. в - клинополосный коллекtor. Импульс заряда, соответствующий координате центроида лавины по вертикальной оси, поступает на электрод W, по горизонтальной на электрод S. На электрод Z поступает оставшаяся часть суммарного заряда, необходимого для нормировки. ЕС - электронное «облако». Рисунки получены от НИИЭПр и В.Г. де Бура.

верхности – 20 мм, - пространственное разрешение – 150 мкм (20000 пикселей – размер рабочего поля); - диапазон длин волн, регистрируемых устройством – 360 – 800 нм; - квантовая эффективность на длине волны 500 нм 4 – 8%; - темновой ток при 20°C – 600 фотоотсч./сек, при 0°C – 300 фотоотсч/сек; - временное разрешение - 2 мкс; - максимальный темп регистрации фотоотсчётов (при линейности 3%) - 50000 фотоотсч./с; - локальная предельная загрузка - 1500 фотоотсч. / (сек*мм²); - статистические параметры потока фотоотсчётов (локального и полного) на временах, превышающих 5 мкс, практически совпадают с теоретически ожидаемыми у случайного потока постоянной средней интенсивностью. С этим прибором начались пробные наблюдения на телескопе Цейсс 1000 и плановые - на БТА [67]. На Рисунке 9 показан пример «обнаружения» импульсного излучения пульсара в Крабовидной Туманности, проведённое в тестовых наблюдениях на телескопе Цейсс-1000.

Описана разработка ФПУ на основе КЧД с квадрантными коллекторами (Рисунок 10б), созданного во ВНИИЭПр под руководством В.Г. де Буром.

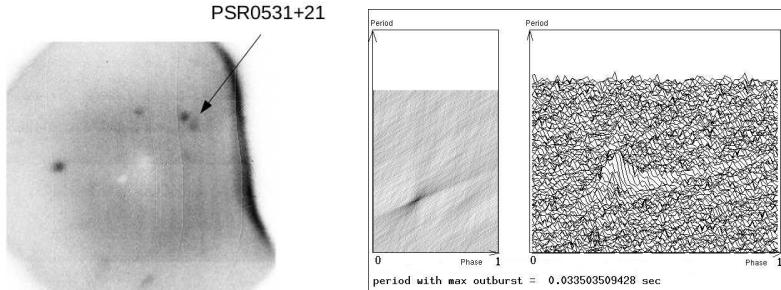


Рис. 9. Слева - поле с пульсаром PSR0531, полученное в наблюдениях с ФПУ на основе клинополосного КЧД на телескопе Цейсс-1000 20 декабря 1999 г. в 10 минутной экспозиции. Посередине и справа результат «поиска» периода веерным методом ЦСД, описанным в первой главе. Период обнаруживается в пространстве периода-фаза в виде характерного подъёма количества отсчётов сферизированной кривой блеска над её средним уровнем с одновременным сужением этой области до ширины пульса.

Их использование приводит к значительным геометрическим искажениям изображения уже на небольшом удалении от центра рабочего поля, которые не могут быть скомпенсированы аппаратно (Коровин, Н. А., Калинин, А. П. и др., Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2009, 1, С. 67-86.). Коррекция проводилась нами аналитически с помощью экспериментально подобранных функций. На Рисунке 10в показано рабочее поле без коррекции, а на Рисунке 10г после её выполнения.

Параметры прибора: чувствительность - около 10% на длине волны 400 нм, размер рабочего поля – 15 мм, пространственное разрешение – 50 мкм. С этим ФПУ проводились наблюдения SGR 1806-20, пульсара в Крабовидной Туманности и исследований вспыхивающих звёзд [21, 71, 24, 25, 27, 34, 68, 73, 35, 74, 75]. Начиная с 2005, года для приёма данных от ФПУ стал использоваться хронометрический комплекс на основе системы регистрации «Квантохрон 4-48», описанный во второй главе.

В институте Физики Полупроводников (ИФПП) СО РАН в 2006 году был разработан КЧД с фотокатодом из арсенида гал-

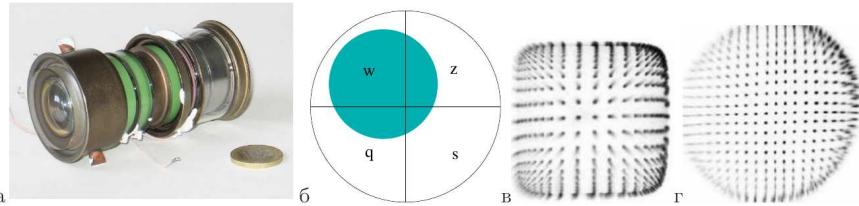


Рис. 10. а - внешний вид КЧД с катодом S20, б - квадрантный коллектор с электронной лавиной, в - рабочее поле детектора без редукции положений центроидов электронных лавин, г - после исправления.

лия, блоком из двух пластин МКП и 16-элементным коллектором (Рисунок 11 а.). На его основе нами создано ФПУ с аналоговым кодированием положений центроидов электронных лавин (Рисунок 11б). Определение их координат проводится по формулам:

$$X = \frac{\sum_{i} \sum_{j} x_{ij} q_{ij}}{\sum_{i} \sum_{j} q_{ij}} \text{ и } Y = \frac{\sum_{i} \sum_{j} y_{ij} q_{ij}}{\sum_{i} \sum_{j} q_{ij}}, \text{ где } x_{ij}, y_{ij} - \text{дискретные}$$

координаты элемента ij ($i, j = -2\dots + 2$), задаваемые проводимостями резистивной матрицы (Рисунок 11б), q_{ij} – заряд элемента, а величины суммарных зарядов кодируются АЦП (аналого-цифровой преобразователь). Фрагмент функциональной схемы электроники для выполнения аналогового суммирования и матричный усилитель показаны на Рисунках 11 б и 11 в. После оцифровки 10-разрядные коды сумм передаются в систему регистрации «Квантохрон 4-48».

Размер рабочего поля - около 12 мм, разрешение – 50 мкм, квантовая эффективность на 550 нм – 30%, предельная скорость счёта от всей поверхности катода – 200000 отсч/с, от точечного источника - 10000 отсч/с. Создание и внедрение ФПУ на основе GaAs-КЧД описаны в публикациях [26, 28, 32, 37].

Детекторы с тремя типами коллекторов: клинополосным, квадрантным и 16-ти элементным были внедрены в наблюдательную практику в САО РАН, – на них проводились и проводятся ныне плановые наблюдения на 6-метровом телескопе и по-

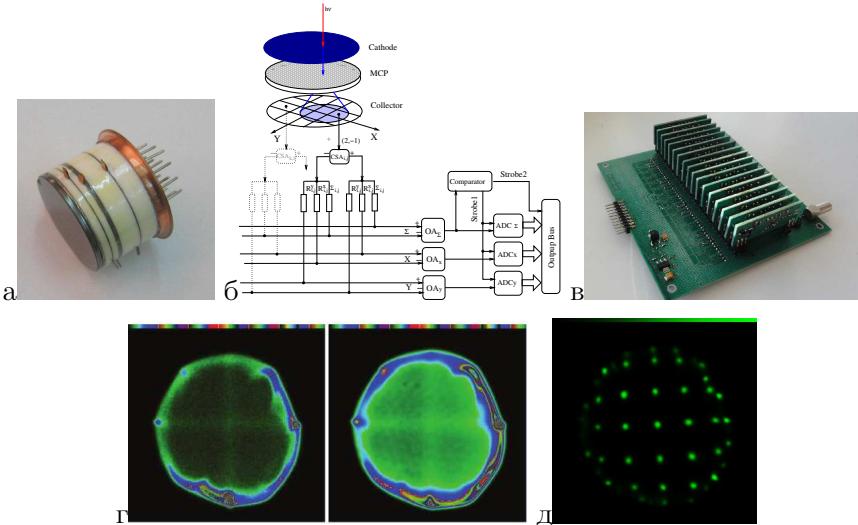


Рис. 11. а - Внешний вид КЧД с GaAs катодом и 16-анодным коллектором, б - Функциональная схема получения координатной информации, в - кроссплата с зарядочувствительными усилителями, г - рабочие поля детектора с темновым током и равномерной засветкой - «плоское поле», д - поле детектора с калибровочными источниками, где размеры точечных изображений $\sim 1''.5$ в масштабе БТА, расстояния между ними – $10''$. Электронника разработана совместно с А.В. и А.А. Солицкими, НИИЯП, Минск.

лучены многочисленные астрофизические результаты, часть которых приведена в главе 5.

В четвёртой главе изложены детали конструкции панорамных фотополяриметров для исследования быстропеременных объектов с высоким временным разрешением на основе координатно-чувствительных фотоприёмных устройств (ФПУ) [23, 29, 31, 33].

Первым прибором из этой серии был широкопольный фотополяриметр [29, 31] (Рисунок 12), в котором на катоде ФПУ строилось изображение рабочего поля полутораминутного размера в одном из UBVR-фильтров системы Джонсона. В пучок излучения мог вводиться анализатор поляризации - дистанционно по-

ворачиваемая на $\pm 22^{\circ}$.5 призма Савара и диафрагма диаметром $10''$. Для подсмотра рабочего поля вблизи исследуемого объекта использовалась TV CCD камера, на которую диагональным зеркалом перебрасывался входной пучок. При этом обеспечивалась возможность обозрения поля размером $\sim 2'.5 \times 3'.5$.

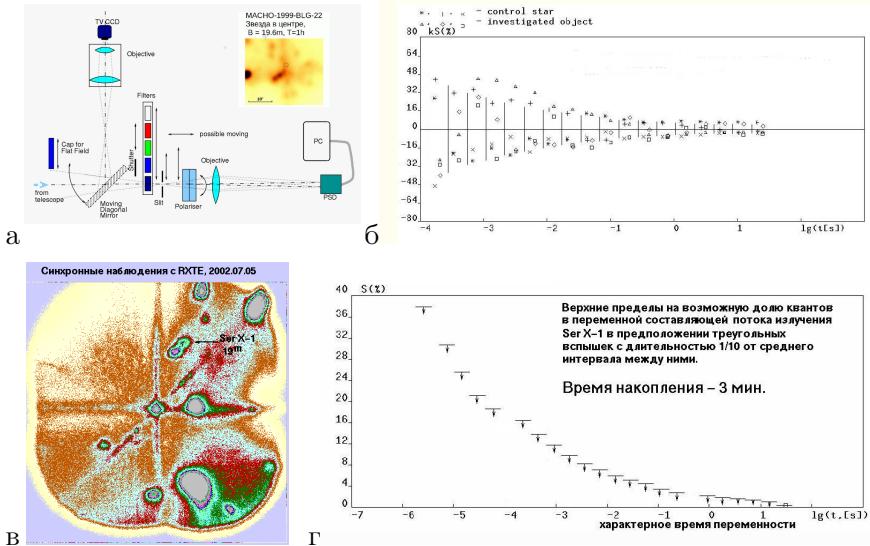


Рис. 12. а - схема однополосного панорамного фотополяриметра. б - изображение поля вблизи объекта MACHO-99-BLG-22, полученное в наблюдениях с этим прибором. в - поле объекта Ser X-1 размером $100''$ в синхронных наблюдениях наблюдениях с RXTE и пределы на переменную компоненту излучения (см. Главы 1 и 5).

На основе приобретённого опыта был сконструирован прототип многолучевого многомодового фотополяриметра (МППР) [71]. Его конструкция изображена на Рисунке 13. Здесь входной пучок попадает на зеркальный узел со щелью, раздвигаемой от 0 до $10''$, в квадратной выемке которой размещена линза поля, диаметром $60''$ (на Рисунке 13б. она установлена на оптической оси). Анализатором поляризации является двойная призма Волластона с призмой, разводящей пары поляризованных лучей. Таким образом, создан полнофункциональный прибор, в котором опти-

ческие блоки могут быть заменены на другие преобразователи излучения, фотометрические или спектрометрические.

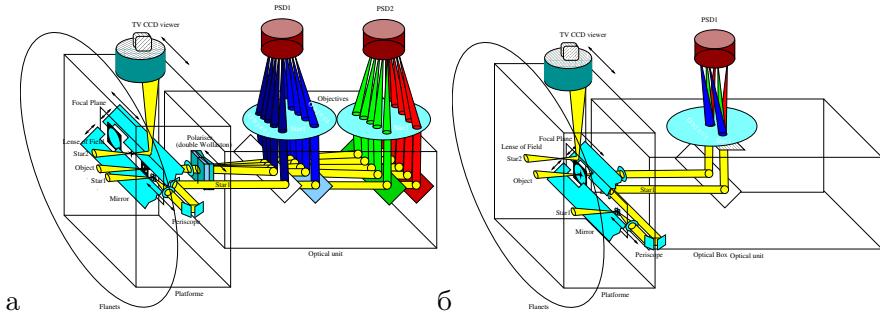


Рис. 13. Ход лучей в перенастраиваемом фотоспектрополяриметре. а - при фотометрическом режиме, б - в спектральной безщелевой моде.

В ныне действующем варианте прибора был добавлен фотометрический канал с EMCCD-камерой, регистрирующей излучение в полосах BVR и интегральном свете, обеспечена возможность дистанционного выбора оптического блока для наблюдений, установлены дырчатые ослабители потоков для реализации оптимального соотношения их уровней у различных объектов. Общая структура наблюдательного комплекса показана на Рисунке 14. Взаимодействие компьютеров организовано по протоколу межпроцессорной связи TCP/IP, как показано на этом же Рисунке (Теренс Чан, Системное программирование на C++ для UNIX. BHV, Киев, 1997).

В конечном итоге МПРР позволяет использовать в наблюдениях любой из дистанционно выбираемых пяти режимов. А именно, — широкополосный режим, в котором входное излучение разделяется на два потока в области ~ 450 нм, после чего «синий» и «красный» компоненты поступают на соответствующие фотоприемные устройства (т. е. на «синий» и «красный» КЧД); — высокочувствительный режим с EMCCD-камерой, при котором накапливаются последовательности кадров в интегральном цвете или полосах BVR с временным разрешением до 0.1 с с синхронной регистрацией отраженных дихроичным зеркалом потоков квантов в U-полосе «синим» КЧД; — фотометрический

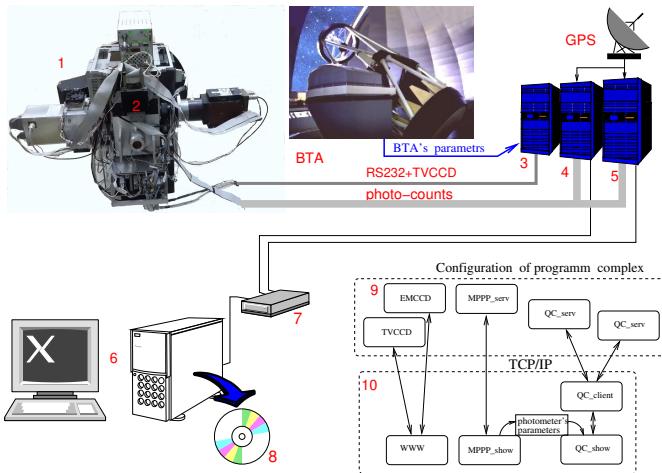


Рис. 14. Наблюдательный комплекс для скоростной хронометрии потоков квантов. 1 – многомодовый панорамный фотоспектрополяриметр (MPPP); 2 – мультиплексор поток данных, передающий в одном потоке отсчёты двух детекторов; 3 – компьютер TV подсмотра и управления кинематикой; 4, 5 – компьютеры приема данных с «Квантхронами 4-48»; 6 – компьютер управления; 7 – сетевой переключатель выделенной линии; 8 – накопленные данные; 9 – компоненты аппаратных компьютеров; 10 – программные модули интерфейсных компьютеров, на которых производится и накопление данных. Фотоколлаж с изображением телескопа заимствован у В. С. Шергина.

режим с регистрацией потоков квантов в одной из полос U или B , и одновременно с этим в двух полосах V и R ; — спектральный режим с призмой Аббе, формирующей бесщелевой спектр с 5–ю элементами разрешения (при секундных изображениях), регистрируемый «красным» КЧД, при одновременной регистрации излучения в U –полосе «синим» КЧД; — спектральный режим с дифракционной решеткой, формирующей спектр с 50-ю элементами разрешения, при аналогичном использовании 2–х КЧД. Эти режимы могут использоваться как с линзой поля, так и со щелью зеркального узла. В параллельный пучок излучения исследуемого объекта может устанавливаться анализатор поляризации

(двойная призма Волластона).

С использованием различных вариантов этого устройства с 2001 года ведутся плановые наблюдения на БТА и получены астрофизические результаты, описанные в работах [24, 25, 27, 34, 36], частично обсуждаемые в главе 5.

В совокупности с фотоприёмными устройствами на основе КЧД и многоканальными хронометрическими системами МПРР позволяет проводить наблюдения высокого временного разрешения с получением максимума информации о каждом зарегистрированном кванте, координатной, энергетической и поляризационной, с высокоточной привязкой к мировому времени.

В пятой главе описаны наблюдения высокого временного разрешения на 6-метровом телескопе САО с использованием методов и приборов, созданных автором диссертации.

В первую очередь был проведен поиск быстрой переменности у нескольких десятков объектов-кандидатов в черные дыры звездных масс в соответствии с предложенным В. Шварцманом experimentum crucis по поиску наблюдательных проявлений горизонтов событий. В результате были получены ограничения на плотность черных дыр звездных масс в окрестностях Солнца на уровне 0.05%. Попутно выполнялись наблюдения пульсаров, и рентгеновских источников, проведена обширная программа наблюдений вспыхивающих звезд. Результаты исследований опубликованы в статьях [1-11, 13-15, 17-21, 24-26, 28, 35-37, 40, 42, 45-47, 49-54, 56-57, 59-62, 64-68, 72-74] и отражены в 4x кандидатских диссертациях и одной докторской.

Так например, в июле 2002 года были проведены наблюдения по поиску стохастических вспышек излучения при аккреции плазмы на предполагаемую черную дыру MACHO-99-BLG-22, были впервые получены верхние пределы для переменности излучения на временах $10^{-3} - 10^{-2}$ сек (Рисунок 12) [68].

У трёх тесных двойных рентгеновских систем были обнаружены вспышки с длительностью вплоть до нескольких миллисекунд, что позволило сделать вывод об их нетепловом (синхротронном) происхождении. При наблюдениях в обсерватории

Casleo, Аргентина в мае 1991 г. у объекта MXB 1735-44 обнаружены две быстрые вспышки [11, 14, 49, 50, 51, 56, 61, 66]. Их кривые блеска с различным временным разрешением приведены на Рисунках 15I и 15II.

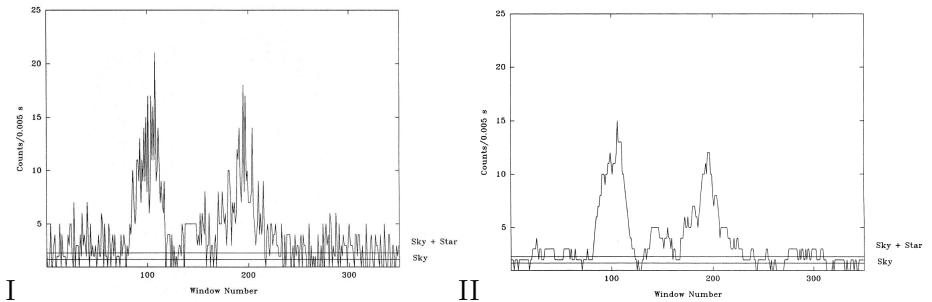


Рис. 15. I - Кривые блеска вспышек MXB 1735-44 с временным разрешением 5 мс; II - Они же после сглаживания. Горизонтальными линиями нанесены средние уровни потоков от фона неба и объекта.

Была проведена долговременная программа изучения активности вспыхивающих звёзд, получены кривые блеска более чем 100 их вспышек с предельным временным разрешением 10^{-6} с, изучена их временная структура, показано, что у самых коротких вспышек длительность передних фронтов может составлять доли секунды. На Рисунке 16в иллюстрируется процедура поиска субсекундной тонкой структуры вспышки красного карлика Wolf 424 [7, 8, 9, 34, 42, 45, 46, 47, 74].

Летом 2002 года на 6-метровом телескопе с помощью панорамного фотополяриметра высокого временного разрешения было проведено несколько циклов наблюдений рентгеновских двойных систем. Хорошее пространственное разрешение аппаратуры ($\sim 0''.3$) и отличные погодные условия (качество изображений было не хуже $1''$) позволили разделить излучение Ser X-1 и звезды-соседки (Рисунок 12).

28 декабря 2008 года удалось обнаружить тонкую структуру гигантской вспышки звезды UV Cet - субсекундные микровспышки (Рисунок 17), чья степень линейной поляризации превысила 20 – 30% [34, 74].

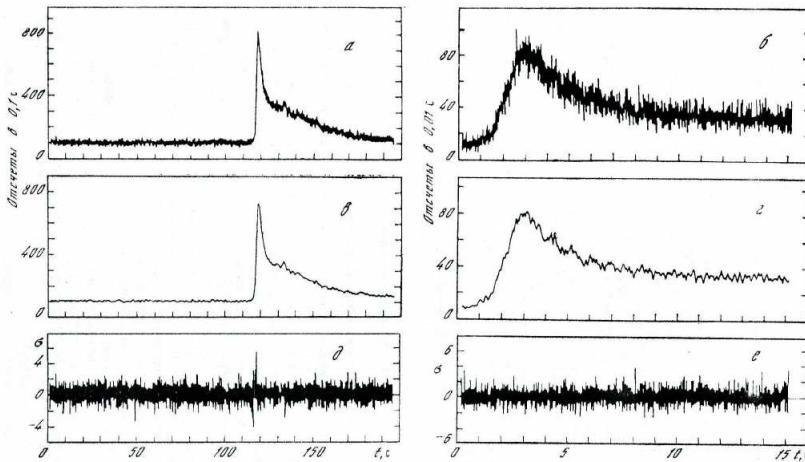


Рис. 16. Кривые блеска быстрой вспышки Wolf 424 19.03.83 UT 1985, построенные с временным разрешением 0.1 с (а) и 0.01 с (б), соответствующие кривые, сглаженные по 11 окнам (в, г) и нормированные невязки (д, е).

Наблюдения пульсаров начались в 1978 году. В 1980 г. удалось получить сферизованные кривые блеска пульсара в Крабовидной Туманности с рекордным времененным разрешением 6.6 мкс (см. Рисунок 3) [4, 53], также был выполнен поиск оптического излучения у миллисекундного пульсара PSR 1937+21 [54]. В 1990е годы наблюдения продолжились с использованием 4-канального электрофотометра и системы «Квантохрон 3-16», синхронизируемой по импульсам с частотой 10 КГц от GPS-сервера времени с точностью привязки к абсолютному времени $\sim 1 \mu\text{s}$. С этого момента точность измерений сферизованной кривой блеска пульсара определялась прежде всего объемом накопленной информации. Метод цифрового синхронного детектирования был использован для анализа данных наблюдений пульсара в Крабовидной туманности, была получена его сферизованная кривая блеска с времененным разрешением 3.3 мкс, и изучена тонкая структура импульсов [17, 62, 64, 65]. Анализ кривой показывает, что на вершине пика нет изрезанности, превышающей допустимый уро-

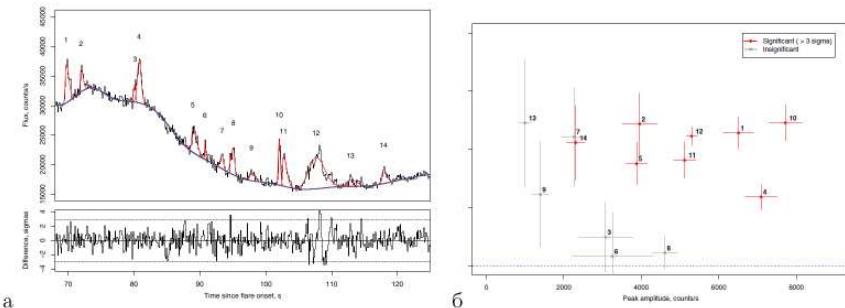


Рис. 17. а - фрагмент кривой блеска гигантской вспышки звезды UV Cet с субсекундными спайками, помеченные номерами, б - нижние пределы по степени средней собственной линейной поляризации спайков, спайки с низкой значимостью поляризации (менее 3σ) показаны слева и внизу, тогда как спайки со значительной поляризацией (с уровнями значимости 10^{-3} – 10^{-5}) находятся посередине и справа.

вень для распределения Пуассона (Рисунок 18 I). Отсюда можно заключить, что регулярная модуляция главного пульса не превышает 3% его амплитуды.

Были определены $(B-V)$ и $(V-R)$ цвета излучения пульсара в восьми фазовых интервалах. К ним относятся - передний фронт главного импульса, пик главного импульса, задний фронт главного импульса, межпульсный промежуток, передний фронт вторичного импульса, пик вторичного импульса, задний фронт вторичного импульса, внепульсное пространство. Поскольку в последнем доминирует, по-видимому, излучение замкнутой части магнитосферы пульсара, его характеристики представляются весьма важными. Они оказались следующими: $B = 21.^m6 \pm 0.^m4$; $V = 20.^m85 \pm 0.^m15$; $R = 20.^m1 \pm 0.^m15$. Для сравнения приведем усредненные по периоду звездные величины объекта – $B = 17.^m4$; $V = 16.^m8$; $R = 16.^m3$. Результаты фотометрии свидетельствуют, что диаграмма направленности пульсара несколько уширяется с ростом длины волны, а спектр излучения во внепульсном пространстве оказывается более крутым, чем в других фазовых промежутках. Результаты этих наблюдений свидетельствуют, что возможны некоторые трудности при объяснении это-

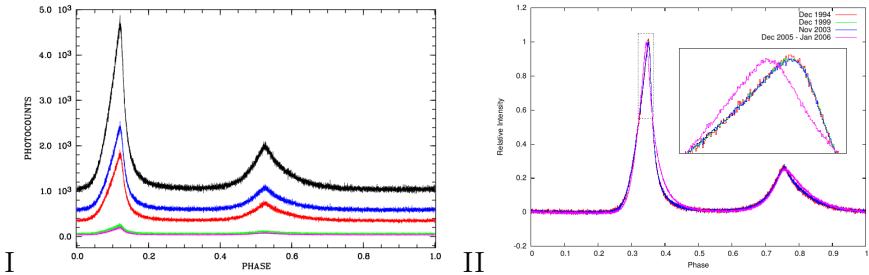


Рис. 18. I - Кривые блеска пульсара в Крабовидной Туманности с разрешением $3.3 \mu\text{s}$, полученные на БТА в декабре 1994 года с 4x-полосным электрофотометром Казанского университета в полосах $U + B + V + R, B, R, V, U$ (сверху вниз). II - Изменение формы главного пульса пульсара в Крабовидной туманности. Сравниваются - сфазированные кривые блеска по данным 1994, 1999, 2003 годов, приведённые к одинаковой амплитуде пульсов, с результатами наблюдений на панорамном фотополяриметре в декабре - январе 2005/06 гг..

го эффекта в рамках стандартной модели, предполагающей генерацию оптического излучения около светового цилиндра. Они показали, что панорамная система регистрации позволяет получить лучшую точность фотометрии, чем это было возможно при наблюдениях с электрофотометром.

В наблюдениях декабря 2005 г. - января 2006 г. удалось заметить существенное изменение формы главного пульса (Рисунок 18 II, [25]), которая в течение месяца вернулась в прежнее состояние.

В двухполосных поляризационных наблюдениях уникального транзистентного пульсара в двойной системе PSR J1023+0038 с периодом 1.69 мс были впервые обнаружены спорадические неполюаризованные вспышки на временах 0.1–10 секунд, а также определен показатель спектра его нетепловой периодической компоненты излучения. Значимые пульсации обнаруживаются лишь в

интервале, который был выделен ранее по спектру мощности (см. Рис. 19).

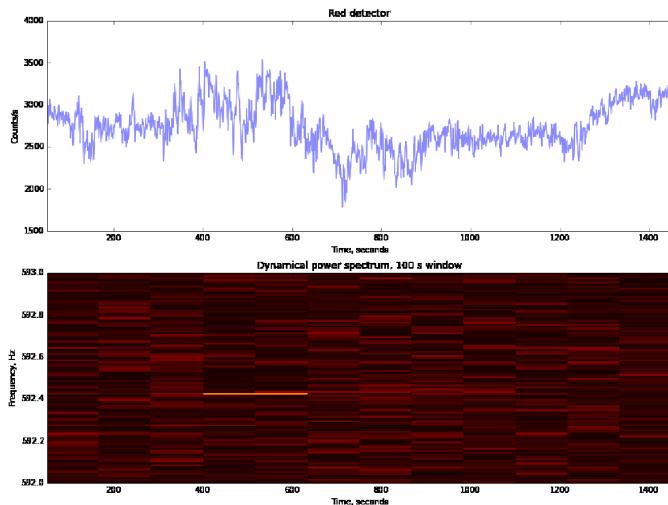


Рис. 19. Кривая блеска с секундным окном и динамический спектр мощности кривой блеска с окном 100 мкс в одном из интервалов наблюдения миллисекундного пульсара PSR J1023+0038, где значимо выделяется спектральная особенность на частоте, близкой к частоте вращения нейтронной звезды.

Амплитуда пульсаций при этом оказывается около 1 – 2% как в «красном», так и в «синем» каналах, при этом форма пульса практически синусоидальная (Рис. 20), в отличие от особенностей пульсаций обнаруженных ранее (Amrosino F., Papitto A. et al., Nature Astronomy 2017, 1, pp. 854 - 858), – их амплитуда составляла около 0.5% при явственно двух пикивой форме профиля.

В Заключении показано, что решение задач исследования астрофизических объектов с высоким времененным разрешением может эффективно выполняться при использовании комплекса аппаратных средств, разработанных соискателем и описанных в диссертации. Они и обеспечивают проведение на БТА всех подоб-

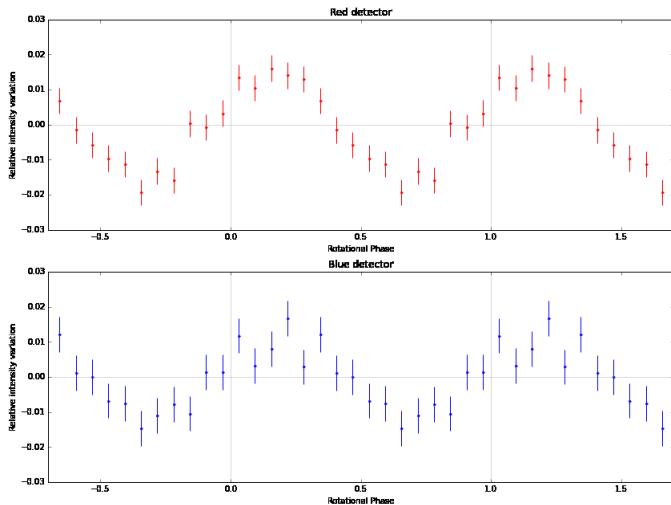


Рис. 20. Относительные вариации интенсивности излучения в «красном» - сверху и «синем» - снизу каналах при свёртке с периодом пульсара после орбитальной коррекции в интервале наблюдений длительностью около 100 с, с обнаруженной спектральной особенностью.

ных наблюдений. За более чем 40–летний период создан аппаратурно-методический комплекс для поиска и исследования оптической переменности астрофизических объектов с высоким временным разрешением. С его помощью было проведено множество наблюдений астрофизических объектов с экстремальными свойствами и получены важные результаты в исследовании пульсаров, рентгеновских источников и вспыхивающих звёзд. Суммарное время плановых наблюдений на БТА с панорамным фотометрическим комплексом начиная с 2000 года составило 285 ночей.

Разработанные методы и средства позволяют выполнять широкий круг исследований экстремальных объектов в новом разделе науки - Time Domain Astronomy (Астрономия во временной области) (Dravins D., in book: Hight Time Resolution Astrophysics, Springer, 2008. - Pp. 95 - 132.).

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Бескин Г. М., Неизвестный С. И. и др. Минимальное время оптической переменности объекта Cyg X-2=V1341 Cyg по наблюдениям на 6-метровом телескопе / Бескин Г. М., Неизвестный С. И., Пимонов А. А., Плахотниченко В. Л., Шварцман В. Ф. // Письма в Астрономический журнал. - 1979. - Т. 5, № 10. - С. 508 - 513.
2. Бескин Г. М., Лебедев В. С. и др. Поиск молодых оптических пульсаров в галактиках NGC 4647 и NGC 4321 / Бескин Г. М., Лебедев В. С., Неизвестный С. И., Плахотниченко В. Л., Шварцман В. Ф. // Письма в Астрономический журнал. - 1981. - Т. 7, № 9. - С. 537 - 542.
3. Лебедев В. С., Неизвестный С. И. и др. Поиск оптического излучения от радиопульсаров на 6-метровом телескопе. /Лебедев В. С., Неизвестный С. И., Пимонов А. А., Плахотниченко В. Л. //Астрономический журнал. - 1983. - Т. 60, № 4. - С.742 - 743.
4. Бескин Г. М., Неизвестный С. И. и др. Оптическая кривая блеска пульсара в Крабовидной туманности с высоким времененным разрешением / Бескин Г. М., Неизвестный С. И., Пимонов А. А., Плахотниченко В. Л., Шварцман В. Ф. // Письма в Астрономический журнал. - 1983. - Т. 9, № 5. - С. 280 - 285.
5. Бескин, Г. М., Неизвестный С. И. и др. Отсутствие оптической переменности во временном диапазоне $10^{-6} - 10$ с у релятивистского объекта SS 434 / Бескин Г. М., Неизвестный С. И., Пимонов А. А., Плахотниченко В. Л., Фабрика С. Н., Шварцман В. Ф. // Астрофизические исследования (Изв. САО). - 1985. - Т. 20. - С. 72 - 77.
6. Бескин Г. М., Богданов М. Б. и др. Обнаружение тесных двойных систем при наблюдениях покрытий звёзд Луной на 6-метровом телескопе / Бескин Г. М., Богданов М. Б., Неизвестный С. И., Пимонов А. А., Плахотниченко В. Л., Шварцман В. Ф. // Астрономический журнал. - 1987. - Т. 64. - С. 108 - 118.
7. Бескин, Г. М., Гершберг Р. Е. и др. Фотометрические исследования вспыхивающих звезд типа UV Кита с временным разрешением 0.0000003 с. на 6-м телескопе/ Бескин Г.М., Гершберг Р. Е., Неизвестный С. И., Плахотниченко В. Л., Пустильник Л. А., Шварцман В. Ф. // Известия КРАО. - 1988. - Т. 79. - С. 71 - 94.
8. Бескин Г. М., Гершберг Р. Е. и др. Исследование структуры вспышек звезд типа UV Кита с временным разрешением 0.0000003 с. /

- Бескин Г. М., Гершберг Р. Е., Журавков А. В., Митронова С. Н., Неизвестный С. И., Плахотниченко В. Л., Путильник Л. А., Чех С. А., Шварцман В. Ф. // Письма в Астрономический журнал. - 1988. - Т. 14, № 2. - С. 156 - 162.
9. Шварцман В. Ф., Бескин Г. М. и др. Минимальное время нарастания блеска звёзд типа UV Кита /Шварцман В. Ф., Бескин Г. М., Гершберг Р. Е., Плахотниченко В. Л., Путильник Л. А. // Письма в Астрономический журнал.- 1988. - Т. 14, № 3. - С. 233 - 239.
 10. Шварцман В. Ф., Бескин Г. М. и др. Поиск сверхбыстрой переменности и UBVR-фотометрия A0620-00 / Шварцман В.Ф., Бескин Г.М., Митронова С.Н., Неизвестный С.И., Плахотниченко В.Л. // Письма в Астрономический журнал. - 1989. - Т. 15, № 7. - С. 590 - 596.
 11. Beskin G. M., Benvenuto O. et al. Investigation of low-mass X-ray binaries with superhigh temporal resolution. Revealing of nonthermal optical flares from a burster MXB 1735-44 / Beskin G. M., Benvenuto O., Feinstein K., Mendez M., Mitronova S., Neizvestny S., Plokhotnichenko V., Popova M., Zhuravkov A. // Bulletin SAO. - 1994. - Vol. 37. - Pp. 132 - 135.
 12. Zhuravkov A. V., Pimonov A. A. et al. «Quantotochron» - a multichannel time-to-code converter / Zhuravkov A.V., Pimonov A.A., Plokhotnichenko V.L. // Bulletin SAO. - 1994. - Vol. 37. - Pp. 159 - 172.
 13. Beskin G., Mitronova S. et al. Investigations of the relativistic and fast variable objects with high time resolution / Beskin G., Mitronova S., Neizvestny S., Plokhotnichenko V., Popova M. // Uspekhi fizicheskikh nauk. - 1994. - Vol. 164. - Pp. 660 - 662.
 14. Beskin G., Neizvestny S. et al. Optical study of LMXBs with high temporal resolution: Evidence for non-thermal flares from MXB 1735-44 / Beskin G., Neizvestny S., Plokhotnichenko V., Popova M., Zhuravkov A., Benvenuto O. G., Feinstein C., Mendez M. // Astronomy and astrophysics. - 1994. - Vol. 289. - Pp. 141 - 147.
 15. Beskin G. M., Mitronova S. N. et al. Optical Behaviour of GRO J0422+32 in different brightnes Levels / Beskin G. M., Mitronova S. N., Neizvestny S. I., Panferova I. P., Plokhotnichenko V. L., Popova M. Yu., Zhuravkov A.V., Bartolini C., Guarneri A., Piccioni A., Zampieri G. // Bull. Spec. Astrophys. Obs. - 1994. - Vol. 38. - Pp. 41 - 45.
 16. Shvartsman V. F., Bernstein I. N. et al. Superfast Photometry with MANIA Complex / Shvartsman V. F., Bernstein I. N., Beskin G. M., Komarova V. N., Neizvestny S. I., Plokhotnichenko V. L., Popova M. Yu., Zhuravkov A. V. // Astronomical Data Analysis Software and

- Systems V. Astronomical Society of the Pacific Conference Series Book Crafters. Inc., San Francisco. - 1996. - Vol. 101. - Pp. 428 - 431.
17. *Komarova V. N., Beskin G. M. et al.* Optical Investigation of the Crab Pulsar: Simultaneous UBVR Light Curves with Time Resolution of 3.3 mcs and Spectroscopy / Komarova V. N., Beskin G. M., Neustroev V. V., Plokhotnichenko V. L. // Journal of the Korean Astronomical Society. - 1996. - Vol. 29. - Pp. 217 - 218.
 18. *Beskin G. M., Komarova V. N. et al.* The investigation of optical variability on time scale of $10^{-7} - 10^2$ s: Hardvare, softvare, results / Beskin G. M., Komarova V. N., Neizvestny S. I., Plokhotnichenko V. L., Popova M. Yu., Zhuravkov A. V. // Experimental Astronomy. - 1997. - Vol. 7. - Pp. 413 - 420.
 19. *Beskin G. M., Komarova V. N. et al.* Investigation of relativistic and fast variable objects with high time resolution / Beskin G.M., Komarova V. N., Mitronova S. N., Neizvestny S. I., Plokhotnichenko V. L., Popova M. Yu. // Bull. Spec. Astrophys. Obs. (1997). - 1998 - Vol. 44. - Pp. 43 - 49.
 20. *Beskin G. M., Pavlova V. V. et al.* Light curve analysis of rapidly variable astronomical objects in the MANIA experiment / Beskin G. M., Pavlova V. V., Plokhotnichenko V. L. // Bull. Spec. Astrophys. Obs. - 2000. - № 50. - C. 74 - 79.
 21. *Beskin G., Debur V. et al.* Search for Optical Activity of SGR 1806-20 at the SAO 6-m Telescope / Beskin G., Debur V., Panferov A., Panferova I., Plokhotnichenko V., Pozanenko A., Loznikov V., Boer M., Atteia J.-L., Klotz A., Ricker G. // Gamma-Ray Burst and Afterglow Astronomy 2001: A Workshop Celebrating the First Year of the HETE Mission. AIP Conference Proceeding. - 2003, 662, - Pp. 583 - 584.
 22. *Debur V., Arkhipova T. et al.* The Position-Sensitive Detector for the 6-meter optical telescope / Debur V., Arkhipova T., Beskin G., Pakhomov M., Plokhotnichenko V., Smirnova M., Solin A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2003. - A 513. - Pp. 127 - 131.
 23. *Plokhotnichenko V., Beskin G. et al.* The Multicolor Panoramic Photometer-Polarimeter with high time resolution based on the PSD / Plokhotnichenko V., Beskin G., Debur V., Panferov A., Panferova I. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2003. - A 513. - Pp. 167 - 171.
 24. *Beskin G., Debur V. et al.* Search for fast optical activity of SGR 1806-20 at the SAO RAS 6-m telescope / Beskin G., Debur V., Plokhotnichenko V., Karpov S., Biryukov A., Chmyreva L., Posanenko A., Hurley K. // Astrophysics and Space Science. - 2007. - Vol. 308. -

- Pp. 477 - 479.
25. *Karpov S., Beskin G. et al.* Short time scale pulse stability of the Crab pulsar in the optical band / Karpov S., Beskin G., de-Boer V., Plokhotnichenko V. // *Astrophysics and Space Science*. - 2007. - Vol. 308. - Pp. 595 - 599.
 26. *Beskin G., de-Bur V. et al.* Panoramic detector with high time resolution on base of GaAs photocathode / Beskin G., de-Bur V., Karpov S., Plokhotnichenko V., Terekhov A., Kosolobov S., Sheibler H., Brosch N., Shearer A., Molinari E. // *Proceedings of the SPIE*. - 2008, Conference Paper Vol. 7021, 9 pp.
 27. *Beskin G., Biryukov A. et al.* Observational appearances of isolated stellar-mass black hole accretion. Theory and observations. / Beskin G., Biryukov A., Karpov S., Plokhotnichenko V., Debur V. // *Advances in Space Research*. - 2008. - Vol. 42, Issue 3. - Pp. 523 - 532.
 28. *de-Bur V., Terekhov A. et al.* Position-Sensitive Detector with GaAs photocathode and high time resolution / de-Bur V., Terekhov A., Kosolobov S., Sheibler H., Beskin G., Karpov S., Plokhotnichenko V. // *Hight Time Resolution Astrophysics: The Universe at Sub-Second Timescales*. AIP Conference Proceedings. - 2008. - Vol. 984. - Pp. 186 - 193.
 29. *Plokhotnichenko V., Beskin G. et al.* Devices and software for optical panoramic observations with microsecond time resolution / Plokhotnichenko V., Beskin G., de-Bur V., Karpov S. // *Hight Time Resolution Astrophysics: The Universe at Sub-Second Timescales*. AIP Conference Proceedings. - 2008. - Vol. 984. - Pp. 194 - 201.
 30. *Плохотниченко В. Л., Солин А. В. и др.* Система регистрации случайных потоков многомерных сигналов «КвантоХрон 4-48» / Плохотниченко В. Л., Солин А. В., Тихонов А. Г. // *Астрофизический бюллетень*. - 2009. - Т. 64, № 2. - С. 204 - 210.
 31. *Плохотниченко В. Л., Бескин Г. М. и др.* Многомодовый panoramicный фотоспектрополяриметр высокого временного разрешения / Плохотниченко В. Л., Бескин Г. М., де-Бур В. Г., Карпов С. В., Бадын Д. А., Любецкая З. В., Любецкий А. П., Павлова В. В. // *Астрофизический бюллетень*. - 2009. - Т. 64, № 3. - С. 322 - 331.
 32. *де-Бур В. Г., Бескин Г. М. и др.* Координато-чувствительный детектор высокого временного разрешения с арсенид-галлиевым фотокатодом / де-Бур В. Г., Бескин Г. М., Карпов С. В., Плохотниченко В. Л., Терехов А. С., Косолобов С. Н., Шайблер Г. Э. // *Астрофизический бюллетень*. - 2009. - Т. 64, № 4. - С. 404 - 410.
 33. *Plokhotnichenko V., Beskin G. et al.* Fast Universal

- Spectrophotopolarimeter for Robotic Telescopes / Plokhotnichenko V., Beskin G., Karpov S., Bondar S., de-Boer V., Lioubetski A., Badjin D. // Advances in Astronomy - 2010, article id. 109681, 6 pages.
34. *Beskin G., Karpov S. et al.* Discovery of the Sub-second Linearly Polarized Spikes of Synchrotron Origin in the UV Ceti Giant Optical Flare / Beskin G., Karpov S., Plokhotnichenko V., Stepanov A., Tsap Yu. // Publications of the Astronomical Society of Australia (PASA). - 2017. - Vol. 34, id. e010, 12 pages.
 35. *Shibanov Yu A., Beskin G. M. et al.* High time resolution multi-band photopolarimetric observations of the binary millisecond redback pulsar J1023+0038 with the BTA / Shibanov Yu A., Beskin G. M., Karpov S. V., Plokhotnichenko V. L., Zyuzin D. A., Kholtynin A. F., Sokolov V. V., Baryshev Yu V. // Journal of Physics: Conference Series. - 2017. - Vol. 932. - P. 5.
 36. *Karpov S., Beskin G. et al.* The study of coherent optical pulsations of the millisecond pulsar PSR J1023+0038 on Russian 6-m telescope / Karpov S., Beskin G., Plokhotnichenko V., Shibanov Yu., Zyuzin D. // Astronomische Nachrichten. - 2019. - Vol. 340, Issue 7. - Pp. 607 - 612.
 37. Плохотниченко В. Л., Бескин Г. М. и др. Фотоприёмное устройство на базе 16-электродного координатно-чувствительного детектора высокого временного разрешения / Плохотниченко В. Л., Бескин Г. М., Кarpов С. В., Солин А. В., Солин А. А., Терехов А. С., Косолобов С.Н., Шайблер Г. Э., де-Бур В.Г., Моисеев С. В., Павлова В. В., Моисеев С. С. // Астрофизический бюллетень. - 2020. - Т. 75. - № 1. - С. 65 - 75.
 38. Плохотниченко В. Л. Эскизный проект системы регистрации потоков стохастических событий высокого временного разрешения // Астрофизический бюллетень. - 2020. - Т. 75, № 2. - С 226 - 234.

Изобретение

39. Пат. N 2012027, «Способ многоканального измерения времени регистрации событий и устройство «Квантохрон» для его осуществления». Изобретение, ВНИИГПЭ, 1991, регистр. N МКИ G04F 10/04, Российская федерация, Комитет Российской Федерации по патентам и товарным знакам (Роспатент) // патентообладатели: Журавков Александр Васильевич и Плохотниченко Владимир Леонидович - Авторы они же. Приоритет изобретения 23 апреля 1991 г., Дата поступления за-

явки 23 апреля 1991г., Заявка N 4942191. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений 30 апреля 1994 г..

Публикации с участием автора

40. Бескин Г. М., Неизвестный С. И. и др. A Photometric system to Search for optical variability on time scale of $3 * 10^{-7}$ to 300 s, main results / Бескин Г. М., Неизвестный С. И., Пимонов А. А., Плахотников В. Л., Шварцман В. Ф. // Instrumentation for Astronomy with large optical telescopes, Ed. Humpres G. M. Reidel. Dordrecht, - 1982. - Pp. 181 - 184.
41. Плахотников В. Л. Программно-алгоритмический комплекс эксперимента «МАНИЯ». Второй этап. Программа поиск переменности // Сообщ. Спец. астрофиз. обсерватории. - 1983, Вып. 38. - С. 29 - 80.
42. Бескин Г. М., Гершберг Р. Е. и др. Поиск тонкой временной структуры вспышек звезд типа UV Кита. / Бескин Г. М., Гершберг Р. Е., Неизвестный С. И., Плахотников В. Л., Пустильник Л. А., Чех С. А., Шварцман В. Ф. // В кн. «Труды международного симпозиума. Вспыхивающие звезды и родственные им объекты». Ереван, - 1986. - С. 60 - 67.
43. Шварцман В.Ф., Бескин Г.М. и др. Оптическая кривая блеска пульсара в Крабовидной туманности с временным разрешением 3.3 мкс. / Шварцман В.Ф., Бескин Г.М., Плахотников В. Л. // «Физика нейтронных звезд. Пульсары и барстеры», (тематический сборник). Ленинград, - 1988, - С. 178 - 183.
44. Шварцман В.Ф., Бескин Г.М., и др. Поиск пульсирующего оптического излучения у миллисекундного пульсара PSR 1937+21 / Шварцман В.Ф., Бескин Г.М., Неизвестный С.И., Плахотников В. Л. // Физика нейтронных звезд, пульсары и барстеры (тематический сборник), Ленинград, - 1988, - С. 184 - 189.
45. Shvartsman V. F., Beskin G. M. et al. High time resolution photometry of red dwarf flare stars: I. A search for fine structures on the optical light curves of flares / Shvartsman V. F., Beskin G. M., Mitronova S. N., Neizvestny S. I., Plokhotnichenko V. L., Pustil'nik L. A. // IAU Coll. No.104, «Solar and Stellar flares», Catania. - 1989. - Pp. 95 - 97.
46. Shvartsman V. F., Beskin G. M. et al. High time Resolution photometry of red dwarf flare stars.: II. The shortest flare rise time / Shvartsman V. F., Beskin G. M., Plokhotnichenko V. L., Pustil'nik L. A., Gershberg R. E. // IAU Coll. No.104, «Solar and Stellar flares», Catania. - 1989. - Pp. 99 - 102.

47. *Shvartsman V. F., Beskin G. M. et al.* High time resolution photometry of red dwarf flare stars: III. The most rapid and faintest observed stellar flares: their physics and statistics / Shvartsman V. F., Beskin G. M., Neizvestny S. I., Plokhotnichenko V. L., Pustil'nik L. A., Gershberg R. E. // IAU Coll. No. 104, «Solar and Stellar flares», Catania. - 1989. - Pp. 103 - 105.
48. *Плохотниченко В. Л.* Аппаратурно-программный комплекс эксперимента МАНИЯ и результаты исследования некоторых релятивистских объектов : Дис. ... кандидата физико-математических наук. 01.03.02 / Плохотниченко Владимир Леонидович. - Нижний Архыз. Специальная астрофизическая обсерватория РАН. - 1993. - 168 с.
49. *Beskin G., Kajsin S. et al.* GRO J0422+32 / Beskin G., Kajsin S., Neizvestny S., Panferova I., Plokhotnichenko V., Tikhonov A., Ugrumov A., Zhuravkov A., Bartolini C., Cosentino G., Guarnieri A., Piccioni A. // Publication: IAU Circ. - 1993. - No. 5863, - p. 2.
50. *Bartolini C., Guarnieri A. et al.* Observations of GRO J0422+32 on high and low optical states / Bartolini C., Guarnieri A., Piccioni A., Beskin G., Plokhotnichenko V., Zhuravkov A. // AIP Conference Paper. - 1994. - № 308. - Pp. 103 - 106.
51. *Beskin G., Neizvestny S. et al.* Optical study of LMXBs with high temporal resolution from CASLEO. Evidence of non-thermal flares from MXB 1735-44 / Beskin G., Neizvestny S., Plokhotnichenko V., Popova M., Zhuravkov A.// Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica. - 1993. - Vol. 26. - Pp. 108 - 111.
52. *Beskin G. M., Neizvestny S. I. et al.* Optical Properties of X-Ray Nova Persei 1992 Near Maximum / Beskin G. M., Neizvestny S. I., Mitronova S. N., Plokhotnichenko V. L., Popova M. Yu., Benvenuto O. G., Feinstein C., Mendez M., Bartolini C., Guarnieri A., Piccioni A. // Astronomical and Astrophysical Transactions. - 1995. - Vol. 8, Issue 4. - Pp. 297 - 305.
53. *Shvartsman V. F., Beskin et al.* Optical Light Curve of the Crab Pulsar with Resolution 3.3 μ s / Shvartsman V. F., Beskin G. M., Plokhotnichenko V. L. // Physics of Neutron Stars. Edited by A.M. Kaminker. Commack, N.Y.: Nova Science Publishers, - 1995., - Pp. 151 - 154.
54. *Shvartsman V. F., Beskin G. M. et al.* A Search for Pulsed Optical Radiation from the Millisecond Pulsar PSR 1937+21 / Shvartsman V. F., Beskin G. M., Neizvestnyi S. I., Plokhotnichenko V. L. // Physics of Neutron Stars. Edited by A. M. Kaminker. Commack, N.Y.: Nova Science Publishers, - 1995., - Pp. 155 - 158.

55. Beskin G., Neizvestny S. et al. MANIA Complex-Hardware and Software for the Investigation of Optical Variability on Time Scales 10^{-7} – 10^2 s / Beskin G., Neizvestny S., Plokhotnichenko V., Zhuravkov A. // Flares and Flashes. Lecture Notes in Physics. - 1995. - Vol. 454. - Pp. 131 - 132.
56. Beskin G. M., Neizvestny S. I. et al. Detection of nonthermal optical flashes with 10^{-3} – 10^{-1} s duration from some LMXBs / Beskin G. M., Neizvestny S. I., Mitronova S. N., Plokhotnichenko V. L., M. Yu. Popova, O. G. Benvenuto, C. A. Feinstein, M. R. Méndez, C. Bartolini, A. Guarneri, R. Minarini, A. Piccioni // 151st IAU Colloquium on Flares and Flashes. Lecture Notes in Physics. - 1995 - Vol. 454. - Pp. 330 - 333.
57. Popova M., Beskin G. et al. Investigation of the optical variability of GRO J0422+32 / Popova M., Beskin G., Mitronova S., Plokhotnichenko V. // 158th Coll. of the IAU Astrophysics and Space Science Library. - 1996. - 208 - Pp. 401 - 402.
58. Mitronova S. N., Beskin G. M. et al. Investigation of the optical variability of relativistic objects with high time resolution / Mitronova S. N., Beskin G. M., Neizvestny S. I., Plokhotnichenko V. L. // 158th Coll. Astrophysics and Space Science Library. - 1996. - 208 - Pp. 403 - 404.
59. Beskin G. M., Neizvestny S. I. et al. Investigation of optical variability of relativistic objects with high time resolution / Beskin G. M., Neizvestny S. I., Mitronova S. N., Plokhotnichenko V. L., Popova M. Yu., Zharikov S. V., Zhuravkov A. V., Benvenuto O. G., Fenstein C., Mendez M., Bartolini C., Guarneri A., Minarini R., Piccioni A., Boriakoff V., Dossa D. // In: Proceedings of the Meeting «Cosmion' 94», Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette Cedex, France. - 1996. - Pp. 372 - 382.
60. Shvartsman V. F., Beskin G. M. et al. Superfast Photometry with MANIA Complex / Shvartsman V. F., Bernstein I. N., Beskin G. M., Komarova V. N., Neizvestny S. I., Plokhotnichenko V. L., Popova M. Yu., Zhuravkov A. V. // Astronomical and Astrophysical Transactions. - 1997. - Vol. 13. - Pp. 13 - 17.
61. Beskin G. M., Mitronova S. N. et al. Photometric Investigation of Low-Mass X-Ray Binaries with High Time Resolution / Beskin G. M., Mitronova S. N., Neizvestny S. I., Plokhotnichenko V. L., Popova M. Yu., Zhuravkov A. V., Bartolini A., Guarneri C. A., Minarini R., Pichioni A., Benvenuto O. G., Fenstein C., Mendez M. // Astronomical and Astrophysical Transactions. - 1997. - Vol. 13. - Pp. 273 - 281.
62. Beskin G. M., Komarova V. N. et al. Results of the Crab Pulsar

- Observation at 6-m Telescope / Beskin G. M., Komarova V. N., Neustroev V. V., Plokhotnichenko V. L. // Gravitation & Cosmology.-1998. - Vol. 4. - Pp. 161 - 165.
63. *Beskin G. M., Debur V. G. et al.* High Time resolution panoramic Sysyten for variable Investigation of faint astronomical objects // Beskin G. M., Debur V. G., Plokhotnichenko V. L., Shearer A. / Colloquim on Physics of Neutron Stars. Ioffe Physici-Technical Institute. St. Peterburg. Russia 25 - 26 May, - 1999, - P. 13.
 64. *Beskin G. M., Komarova V. N. et al.* The Crab pulsar in UBVR bands simultaneously with 3.3 microsecond resolution / Beskin G. M., Komarova V. N., Plokhotnichenko V. L. // Proceedings of the XIXth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics and Cosmology «Texas in Paris»; Nuclear Physics B; CD-ROM. - 2000, 80, - Pp. C1103 - C1107.
 65. *Beskin G. M., Plokhotnichenko V. L. et al.* Results and prospects of the search for single stellar mass black holes / Beskin G. M., Plokhotnichenko V. L., Shearer A., Golden A., Redfern M. // Proceedings of the XIXth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics and Cosmology «Texas in Paris». Nuclear Physics B. - 2000, 80. - Pp. C1206 - C1210.
 66. *Beskin G. M., Plokhotnichenko V. L. et al.* Non-thermal optical flashes of some LMXBS /Beskin G. M., Plokhotnichenko V. L., Bartolini C., Guarnieri A., Masetti N., Piccioni A. // Proceedings of the XIXth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics and Cosmology «Texas in Paris»; Nuclear Physics B; - 2000, 80, - Pp. C1503 - C 1510.
 67. *Beskin G. M., Debur V. G. et al.* Investigations of the pulsars with high time resolutions /Beskin G. M., Debur V. G., Komarova V. N., Plokhotnichenko V. L., Shearer A., Redfern R. M., Golden A. // In: Astrophysics at the Edge of Two Centuries, Moscow. - 2001, - Pp. 123 - 131.
 68. Бескин Г. М., де-Бур В. Г., и др., Поиск наблюдательных проявлений вероятной черной дыры гравитационной линзы MACHO-BLG-22 в оптике и рентгене. / Бескин Г. М., де-Бур В. Г., Карпов С. В., Плохотниченко В. Л. // ВАК-2004 «Горизонты вселенной». Тезисы докладов. МГУ, ГАИШ. - 2004, том LXXV, - С. 183.
 69. Biryukov A., Beskin G. et al. A study of PSR 0531+21 light curve with 6.6 us temporal resolution / A. Biryukov, G. Beskin, V. Debur, S. Karrov, V. Plokhotnichenko, I. Zolotukhin, A. Shearer, P. O'Connor, A. Golden, G. Hallinan, M. Redfern, O. Ryan, // Сборник «7th Russian Conference on Physics of Neutron Stars», - 2005, -P. 23
 70. Karrov S., Beskin G. et al. High temporal resolution 2-d multiband

- photometry of the Crab pulsar with the 6-meter telescope / S. Karpov, G. Beskin, A. Biryukov, V. Debur, A. Panferov, I. Panferova, V. Plokhotnichenko, I. Zolotukhin // Сборник «7th Russian Conference on Physics of Neutron Stars», - 2005, - C. 47.
71. *Beskin G., Debur V. et al.* Search for the event horizon by means of optical observations with high temporal resolution / Beskin G., Debur V., Karpov S., Plokhotnichenko V., Biryukov A. // Black Holes from Stars to Galaxies – Across the Range of Masses. Proceedings IAU Symposium No. 238. - 2006. - Pp. 159 - 163.
 72. *Karpov S., Beskin G. et al.* Pulse variation of the optical emission of Crab pulsar / Karpov S., Beskin G., Biryukov A., Plokhotnichenko V., Debur V., Shearer A. // arXiv:0709.2580v1 [astro-ph] 17 Sep - 2007, - 9 pp.
 73. *Karpov S., Beskin G. et al.* Search for isolated black holes: past, present, future / Karpov S., Beskin G., Plokhotnichenko V. // Acta Polytechnica. - 2014. - Vol. 54, No 4. - Pp. 271 - 274.
 74. *Beskin G., Karpov S. et al.* Polarimetric Observations of Flare Stars / Beskin G., Karpov S., Plokhotnichenko V., Stepanov A., Tsap Y. // Stars: From Collapse to Collapse (Astronomical Society of the Pacific Conference Series. - Vol. 510). - 2017. - Pp. 303 - 308.
 75. *Beskin, G. M., Karpov, S. V. et al.* High time resolution multi-band photo-polarimetric observations of the binary millisecond redback pulsar J1023+0038 with the BTA / Beskin G. M., Karpov S. V., Plokhotnichenko V. L., Shibanov Yu. A., Zyuzin D. A., Kholygin A.F., V. V. Sokolov V. V., Baryshev Yu. V. // 2017, INR RAS, Moscow, Journal of Physics: Conference Series. - 2018. - Vol. 932. - Pp. 24 - 31.
 76. *Beskin G., Karpov S. et al.* The study of coherent pulsations of optical emission of PSR J1023+0038 millisecond pulsar / Beskin G., Karpov S., Plokhotnichenko V., Shibanov Yu., Zyuzin D. // in Proceedings of the International Conference «The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves», Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS). 2018, Pyatigorsk, - 2019. - Pp. 37 - 43.