

УДК 524.3-3:52.13/17

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПАНОРАМНЫЙ ФОТОПОЛЯРИМЕТР ВЫСОКОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ФОКУСА Н1 БТА

© 2022 В. Л. Плохотниченко<sup>1\*</sup>, Г. М. Бескин<sup>1,2</sup>, С. В. Карпов<sup>1,2,3</sup>, В. С. Шергин<sup>1</sup>,  
Е. П. Городовой<sup>1</sup>, А. Г. Гутаев<sup>1,2</sup>, А. П. Любецкий<sup>1,4</sup>, В. В. Павлова<sup>4</sup>, В. Н. Черненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

<sup>3</sup>CEICO, Институт физики, Академия наук Чехии, Прага 18221 Чехия

<sup>4</sup>ООО Инженерное бюро «ЦЕВЛАП», Ростов-на-Дону, 344065 Россия

Поступила в редакцию 16 августа, 2022; после доработки 20 сентября, 2022; принята к публикации 23 сентября, 2022

Описывается конструкция и функции основного компонента автоматизированного комплекса для исследований астрофизических объектов с высоким временным разрешением на 6-м телескопе САО РАН — фотополариметра постоянной готовности, установленного в фокусе Н1 БТА для алертных наблюдений оптических транзиентных источников. Прибор функционирует в нескольких режимах (до шести в перспективе) — спектральных, поляриметрических, фотометрических, выбор из которых определяется после анализа в реальном времени изображения области локализации объекта, регистрируемого в подсмотре с полем зрения  $2.5 \times 3'$ . Излучение окрестности обнаруженного источника переносится в диафрагму изменяемого размера от  $10'' \times 10''$  до  $60'' \times 10''$  и в зависимости от его яркости, прошедшее через один из фильтров *UBVR* или диспергированное призмой Аббе, регистрируется ЕМССД с временным разрешением 0.1 с. При этом возможно введение во входной пучок двойной призмы Волластона, что обеспечивает измерение линейной поляризации объекта. Для компенсации вращения поля зрения прибора при наблюдениях на балконе фокуса Н1 используется поворотный стол, положение которого задается системой управления телескопа. Контроль процесса наблюдений, выбор и смена режимов осуществляется с помощью графического интерфейса. Проводится отработка автоматической реализации этих операций.

Ключевые слова: *инструменты: детекторы — инструменты: фотометры — инструменты: поляриметры*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Особое место среди изучаемых астрономических феноменов принадлежит транзиентным явлениям (объектам, процессам), чья продолжительность достаточно мала по сравнению с характерными временами эволюции космических объектов. К ним относятся как стохастические вариации интенсивности излучения (вспышки) разных частот (от радио до гамма) уже известных астрономических объектов — Солнца, переменных звезд, активных ядер галактик, рентгеновских источников, так и вновь обнаруживаемые транзиенты — вспышки новых и сверхновых, гамма-всплески (GRB), быстрые радиовсплески, гравитационно-волновые импульсы. (Подчеркнем, что упомянутые явления часто прежде всего регистрируются в радио-, рентгеновском, гамма-диапазонах как вариации гравитационного потенциала соответствен-

но). Однако возможности понимания их природы, построения их моделей в определяющей степени обуславливаются обнаружением и исследованием проявлений таких феноменов в оптической диапозоне — оптических транзиентов.

Транзиентные события связаны с нестационарными источниками излучения как в Галактике и на космологических расстояниях, так и с явлениями в околоземном пространстве — относительно неподвижными (северные сияния, сверхмолнии), и движущимися (кометы, астероиды, метеориты, спутники, космический мусор). Их характерные длительности лежат в диапазоне от миллисекунд (гамма- и радиовсплески, гравитационно-волновые импульсы, сверхмолнии) до минут—недель (транзиты экзопланет, вспышки переменных, новых и сверхновых звезд, ядер галактик).

Очевидно, что регистрация такого рода нестационарных событий возможна при непрерывном мониторинге небесной сферы высокого временного

\*E-mail: pv1@sao.ru

разрешения (во всех диапазонах электромагнитного спектра, а также с помощью гравитационных и нейтринных детекторов) и анализе данных в реальном времени. С другой стороны, поскольку основные по мощности процессы разыгрываются на короткой временной шкале, для детального исследования этих явлений (объектов) необходимо как можно более быстрое подключение к их наблюдениям максимально крупных наземных оптических инструментов, снабженных аппаратурой высокого временного разрешения.

Необходимость решения множества сформулированных выше задач привела к возникновению нового направления в астрономии — Time Domain Astronomy. На сайте соответствующей рабочей группы МАС<sup>1</sup> приводятся сведения о 62 инструментах, исследующих переменные объекты. Их характеристики весьма разнообразны: апертуры телескопов меняются от 40 мм (KELT-North<sup>2</sup>) до 6.7 м (строящийся LSST<sup>3</sup>), поля зрения — от десятков угловых минут (например, Super-LOTIS (Williams et al. 2008)) до сотен квадратных градусов (Pi of the Sky, (Mankiewicz et al. 2014)). И все это впечатляющее разнообразие инструментов нацелено на массовое детектирование и исследование переменных объектов во Вселенной. Сколь объемнен список телескопов, столь же широк и диапазон конкретных задач, для решения которых предназначены эти инструменты. Сюда входят наблюдения метеоров, комет и астероидов (угрожающих, в том числе), искусственных спутников, космического мусора, поиски эффектов микролинзирования (например от экзопланет), изучение переменных звезд — от новых до мирид, исследования оптических послесвечений гамма-всплесков и поиски оптических вспышек, синхронных с всплесками, поиски сверхновых, изучение вариаций блеска ядер галактик. В настоящее время одной из важнейших задач наблюдательной астрофизики являются поиск и исследование оптических компаньонов быстрых радиовсплесков и гравитационно-волновых импульсов, особенно в связи с обнаружением события GW 170817, обусловленного слиянием двух нейтронных звезд (Abbott et al. 2017), которому сопутствовала вспышка электромагнитного излучения, правда, в гамма-диапазоне. Продолжительность таких событий лежит в диапазоне от миллисекунд до нескольких секунд, однако послесвечение, с ними связанное (оптическое, в том числе) может продолжаться месяцы.

Последнее обстоятельство обуславливает необходимость подключения к наблюдениям этих яв-

лений крупных оптических телескопов, снабженных разнообразной аппаратурой. В то же время, поскольку основные по мощности процессы разыгрываются на короткой временной шкале, то и эти наблюдения должны начинаться как можно раньше.

Приведенные соображения позволяют конкретизировать требования, которым должен отвечать прибор, предназначенный для детального изучения оптических транзиентов.

1. Постоянство установки на телескопе.
2. Достаточно большое поле зрения, причем, при наведении с использованием подсмотра — с полем  $2'–3'$  (поскольку координаты обнаруженного в различных обзорах переменного источника (транзиента) часто имеют невысокую точность), а при исследовании — на уровне  $1'$ , что позволяет повышать отношение  $S/N$ , регистрируя изображение объекта, а не поток его излучения (как в приборах с апертурными диафрагмами), а также одновременно наблюдая объект сравнения. Последнее обстоятельство весьма существенно при изучении стохастической изменчивости.
3. Реализация различных мод (режимов) наблюдений — фотометрия, спектроскопия, поляриметрия — при их одновременном использовании или быстрой смене для получения максимума информации об излучении объекта.
4. Высокое временное разрешение, по крайней мере, на уровне долей секунды, а в идеале — до долей миллисекунды. Напомним, что длительность и тонкая временная структура некоторых транзиентов (гамма и гравитационно-волновые события, радиобарстеры), а также шкала изменчивости нестационарных источников (пульсары, рентгеновские системы) достигают долей миллисекунды.
5. Обработка и анализ данных в реальном времени для оперативного управления процессом наблюдений, выбора и смены их режимов, передачи информации в сети.
6. Интеграция информационной структуры прибора с компьютерным кластером 6-м телескопа для управления последним в реальном времени на основании результатов наблюдений.
7. Включенность в мировые информационные сети для оперативного обмена информацией с другими наземными и космическими инструментами.
8. Полная автоматизация прибора на основе специализированного математического обеспечения, позволяющего реализовать все этапы функционирования аппаратуры без вмешательства оператора.

<sup>1</sup><http://timedomainastronomy.net>

<sup>2</sup><https://keltsurvey.org/planets/telescopes/kelt-north>

<sup>3</sup><https://www.lsst.org/>

В контексте этих требований рассмотрим некоторые из используемых инструментов высокого временного разрешения, устанавливаемых на крупных телескопах. На телескопе GTC<sup>4</sup> (10.4 м) в универсальном приборе OSIRIS для наблюдений в оптическом диапазоне, смонтированном в фокусе Нэсмит-В, реализованы два режима, указанные как скоростные, — быстрая фотометрия (fast photometry) и фотометрия с переносом кадров (frame transfer photometry). Несмотря на большое исходное поле зрения (7'8 × 8'5) и большой формат мозаики Magcon CCD44-82 (2 × 2048 × 4096 пикселей) в первом режиме используется трехсекундная щель, единственный из пяти Слоановских фильтров, а временное разрешение составляет 12 с. В режиме переноса кадров поле имеет большие размеры (7' × 3'5), однако также используется единственный (из пяти) фильтр при временном разрешении 4.3 с. И наконец, в этом инструменте не предусмотрена смена режимов в процессе наблюдений.

Здесь же установлен в качестве гостевого прибора инструмент HiPERCAM — панорамная система, состоящая из пяти матриц Teledyne E2V CCD231-42, на которых строится изображение поля размером 2'8 × 1'4, разделенное четырьмя дихроичными фильтрами на пять компонент, в пяти слоановских полосах (Dhillon et al. 2018). Этот инструмент позволяет проводить синхронную фотометрию в указанных фильтрах с временным разрешением вплоть до 1 мс (при шестикратном бинировании и редукции поля до размера 24 × 24 пикселя). Он может быть установлен и на телескопах меньших размеров, WHT (4.3 м) и NTT (3.6 м), с увеличением поля зрения. Тем не менее HiPERCAM нельзя признать соответствующим приведенным выше требованиям. Прежде всего, он не предназначен для стационарного размещения, а является «кочующим» прибором, ориентированным только на многополосную фотометрию. Его математическое обеспечение не направлено на анализ данных и смену режимов (скажем, временного разрешения) в реальном времени, а также реализацию роботического режима функционирования. Несколько фотометров высокого временного разрешения установлены на телескопах SAAO<sup>5</sup> (Южно-Африканская Астрономическая Обсерватория). На телескопе SALT (10.1 м) используется координатно-чувствительный детектор BVIT (Siegmond et al. 2008) с полем зрения 1'9, чувствительностью около 16% и временным разрешением 0.25 мкс. Однако этот прибор снабжен лишь набором различных фильтров и

функционирует как одноканальный панорамный фотометр, как и его копия, установленная на метровом телескопе Ликской обсерватории. Эти инструменты не могут функционировать в автоматическом режиме. В SAAO имеется также быстрый панорамный фотометр SHOC (Corpejans et al. 2013) используемый на телескопах 1.9 м, 1 м и 0.75 м, где детектором служит мегапиксельная EMCCD-матрица с полем 1'–3' и предельным временным разрешением 10 мс (при бинировании и редукции поля). Аналогичный прибор (MORIS) установлен на 3-м телескопе NASA IRTF<sup>6</sup>. Все эти системы не автоматизированы, не обладают набором режимов, не могут получать максимум информации разного рода о быстропеременных объектах. Совсем недавно был установлен на 5-м Паломарском телескопе инструмент CHIMERA (The Caltech High-speed Multi-colour camERA), являющийся двухканальным панорамным фотометром на базе двух EMCCD-матриц, позволяющих одновременно регистрировать излучение в двух полосах синего и красного диапазонов с временным разрешением от 40 до 1 мс (Harding et al. 2016). Здесь явно не хватает спектральной и поляризационной мод, а также автоматизации их смены. В то же время панорамный поляриметр GASP, измеряющий синхронно четыре параметра Стокса, использует также две EMCCD-матрицы (Collins et al. 2013). В этой конфигурации временное разрешение может достигать 2.5 мс, а при замене матриц на восемь лавинно-пролетных диодов — доходит до микросекунд. К сожалению, ни спектральная мода, ни фотометрическая с одновременной регистрацией излучения разных диапазонов в этом приборе не реализованы, как и его автоматизация.

Упомянем также используемые на разных телескопах фотометры на базе лавинно-пролетных диодов (SPAD) (Barbieri et al. 2009, Kanbach et al. 2008, Meddi et al. 2012) и сверхпроводящих детекторов (Mazin et al. 2013, Romani et al. 2001, Verhoeve et al. 2006). В последнем случае речь идет о спектроскопии низкого разрешения на основе прямого измерения энергии отдельных фотонов. Несомненно этому классу приемников принадлежит будущее, — в частности, такие инструменты планируется использовать на 39-м телескопе E-ELT (Mazin et al. 2019). Однако оба типа этих детекторов состоят из небольшого числа элементов (максимум — 200 × 200), что существенно затрудняет их использование для обнаружения слабых оптических источников с координатами невысокой точности.

Таким образом, в настоящее время нет приборов, соответствующих сформулированным выше

<sup>4</sup><http://www.gtc.iac.es/>

<sup>5</sup><https://www.saa.ac.za/citep>

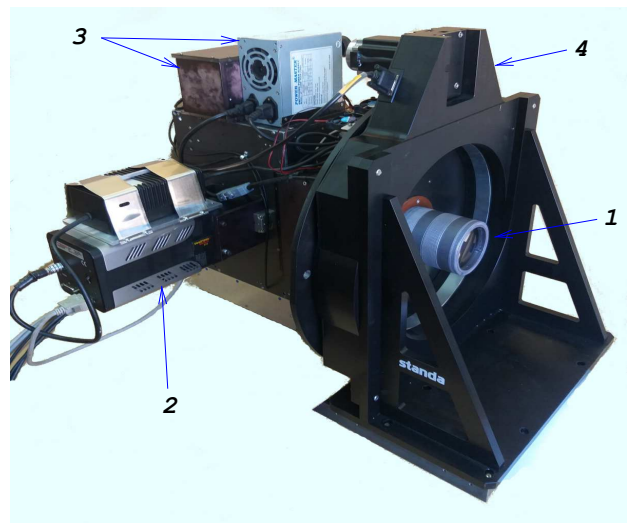
<sup>6</sup><http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/>

требованиям для инструментов, ориентированных на детальное исследование вновь обнаруженных нестационарных явлений и процессов (разумеется, сюда относятся и стохастические проявления активности известных источников излучения). Именно для решения этих задач в САО РАН создан фотополяриметр высокого временного разрешения для постоянного размещения в фокусе Н1 6-м телескопа. Этот полностью автоматизированный комплекс, способный обеспечивать прием данных о наблюдаемом объекте, управление телескопом при наведении на него, выбор режима на основании начальной информации, обработку данных в реальном времени, коррекцию режима с ее использованием, прекращение наблюдений. При этом обеспечено несколько мод наблюдений для получения максимума характеристик излучения объекта (спектральных, поляриметрических, фотометрических) с высоким временным разрешением, по крайней мере, на уровне субсекунд.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ ФОТОПОЛЯРИМЕТРА ВЫСОКОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Фотополяриметр высокого временного разрешения (ФПВВР) сконструирован с учетом опыта создания МРРР (Plokhotnichenko et al. 2021) — многоцветного панорамного фотометра-поляриметра с высоким временным разрешением в первичном фокусе (ПФ), — адаптирован и оптимизирован для выполнения поисково-исследовательских работ в автоматическом режиме. Он позволяет проводить фотометрию в  $UBVR$ -полосах и спектроскопию низкого разрешения с призмой Аббе при одновременном измерении трех параметров Стокса с помощью двойной призмы Волластона (Oliva 1997). Временное разрешение прибора составляет 0.1 с и может быть увеличено при использовании более скоростных EMCCD-матриц. Регистрация излучения может проводиться в широком поле зрения размерами  $1' \times 1'$  или со щелью с размерами  $1''-10'' \times 10''-60''$ . Общий вид прибора на стендовой монтажке показан на рис. 1, а его оптическая схема — на рис. 2.

При наведении на область локализации объекта и для контроля условий наблюдений используется обзорный режим, в котором камерой подсмотра регистрируется излучение поля зрения размером  $3.5 \times 2.5$ , построенное объективом конечного переброта. После обнаружения объекта комплекс в реальном времени автоматически перенастраивается для выполнения фотометрии или фотополяриметрии в широком, минутном поле или с выделением части потока на щели. Если же объект достаточно яркий, то можно регистрировать спектр низкого разрешения (с определением трех параметров Стокса либо без него).



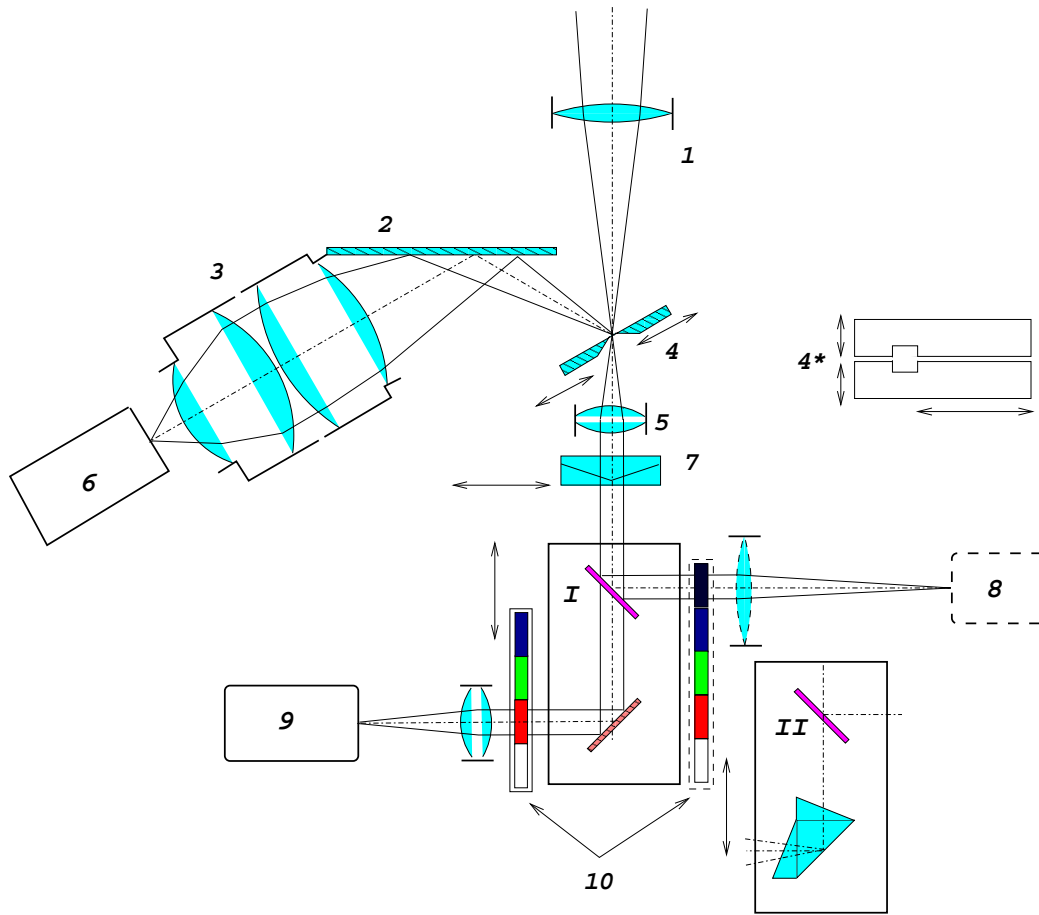
**Рис. 1.** Фотополяриметр высокого временного разрешения (ФПВВР) на поворотном круге, закрепленном в лабораторном удерживающем устройстве: 1 — адаптер светосилы, установленный в посадочном фланце, 2 — EMCCD-камера, источником питания, закреплённая на кожухе блоков трансформации излучения, 3 — источник питания и контроллер управления, 4 — поворотная платформа Standa для компенсации вращения поля зрения.

В ФПВВР реализованы (в минимальной конфигурации, см. рис. 2) два канала регистрации потоков излучения: при подсмотре поля зрения с использованием TVCCD камеры и исследовательский, где в качестве основного детектора выступает прибор EMCCD Princeton Instruments Photonmax формата  $512 \times 512$  пикселей размером  $16 \times 16$  мкм с полем зрения  $8.19 \times 8.19$  мм, что в выбранной оптической схеме составляет около  $1'$ , и скоростью считывания до 10 Гц.

Установка узлов фотометра выполняется дистанционно с помощью компьютера управления, получающего команды от компьютера принятия решения и сбора данных. Поток кадров регистрируется с временным разрешением вплоть до 0.1 с.

В алертном<sup>7</sup> режиме постоянной готовности информация о транзientах автоматически поступает в управляющий ФПВВР компьютер и систему управления БТА, после чего по разрешению руководителя текущей программы телескоп перенаводится на область локализации объекта. В начале наблюдений поток от этой области с помощью подвижного зеркально-щелевого узла (2, 3, 4 на рис. 2) регистрируется детектором подсмотра (6) без фильтра. При этом исследовательский (8, на

<sup>7</sup>Оперативного реагирования, от англ. *alert* — тревога, будильник.



**Рис. 2.** Оптическая схема ФПВВР (минимальный вариант — сплошные линии, расширенный — штриховые). 1 — адаптер светосилы, 2, 3 — вторичное зеркало и объектив подсмотра, 4 — зеркально-щелевой узел и его проекция (4\*) на фокальную плоскость, 5 — входная линза коллиматора, 6 — TVCCD-камера подсмотра, 7 — поляризатор (двойная призма Волластона), 8 — координатно-чувствительный детектор (КЧД) с коллиматором, 9 — быстрая EMCCD-камера с коллиматором, 10 — линейки *UBVR*-фильтров. I — фотометрический блок; II — спектральный блок с призмой Аббе. Дихроичные фильтры на входе блоков I и II выделяют *U*-полосу для детектирования на КЧД в расширенном варианте ФПВВР.

настоящий момент планируемый, и/или 9) канал уже готов к приему данных.

В течение нескольких секунд на основании полученных в режиме подсмотра данных и априорной информации о транзiente выбирается и активизируется в зависимости от яркости объекта одна из мод наблюдений (фотометрия или спектроскопия низкого разрешения) и устанавливается режим функционирования детекторов, а также размер регистрируемой области (полное поле или его фрагменты). Возможные моды наблюдений: в белом свете или с одним из набора *UBVR*-фильтров; спектральная с призмой Аббе. При достаточно высокой интенсивности излучения исследуемого объекта в пучок может вводиться двойная призма Волластона, с помощью которой определяются три параметра Стокса (степень линейной поляризации).

Конструктивно фотополяриметр состоит из бокса сменных блоков, системы подсмотра и поляриметрического узла. Внутри бокса размещен узел с набором *UBVR*-фильтров. Система подсмотра содержит зеркально-щелевой узел (см. рис. 2 и рис. А.1 Приложения) со щелью переменной ширины, которая направляет входящий пучок на видеокамеру подсмотра VS-СТТ-285. Пучок проходит через сверхсветосильную сборку из объективов Индустар-11 и РО-109, укорачивающую фокусное расстояние телескопа до 14 м (при работе в первичном фокусе телескопа) и обеспечивающую на матрице подсмотра поле зрения около  $3'5 \times 2'5$ . Вслед за этим узлом на оптической оси размещен входной объектив коллиматора с фокусным расстоянием 5 см и полем зрения диаметром 1' Carl Zeiss Jena Biotar 1.4/50.

Щелевой узел смонтирован на подвижной ка-

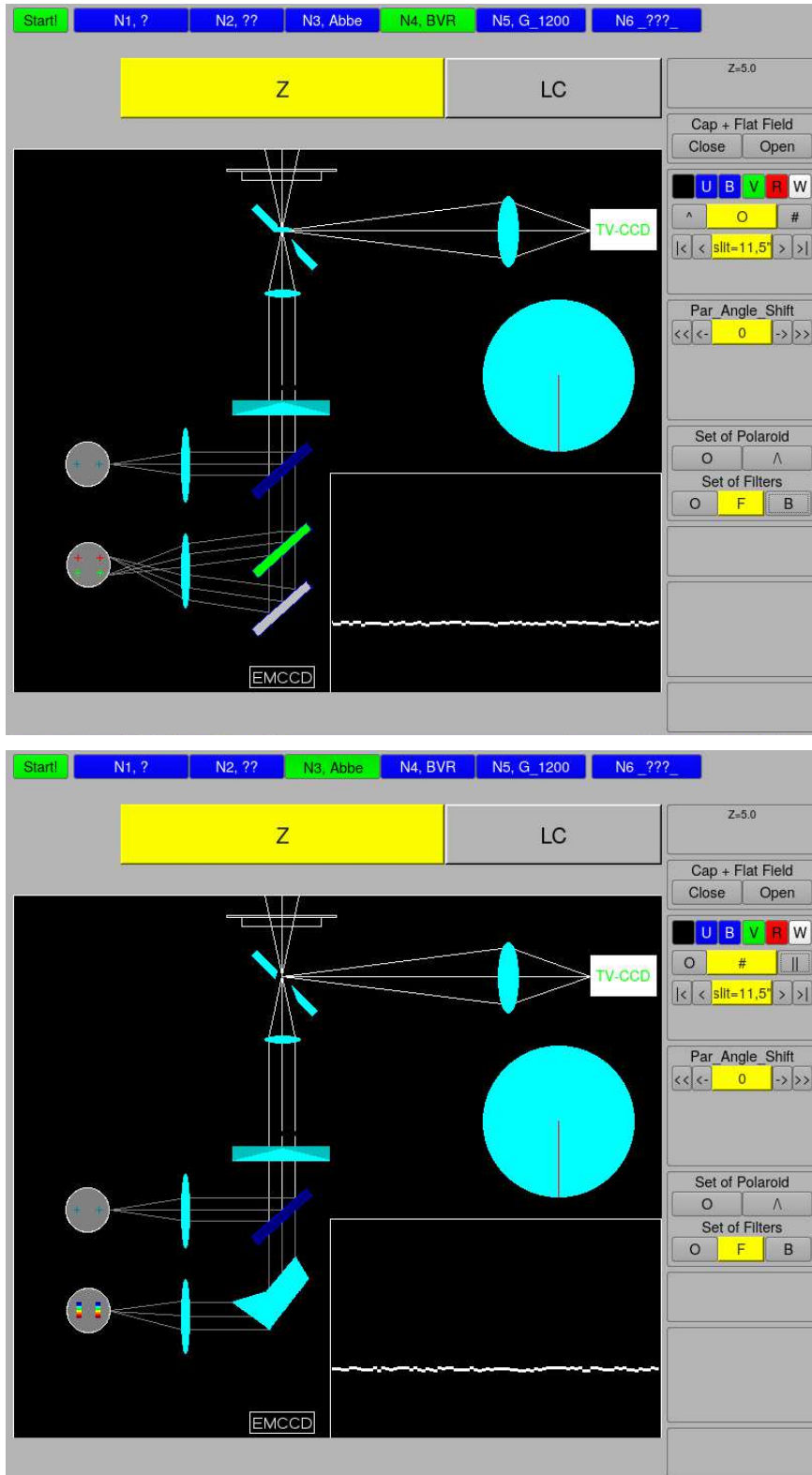
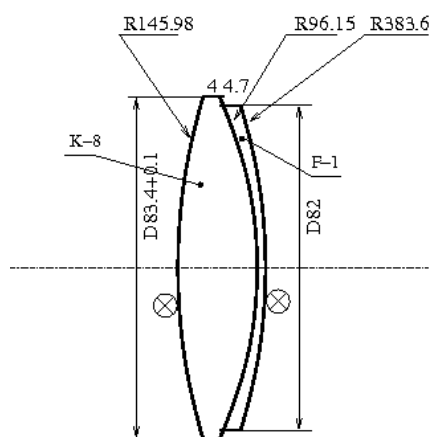


Рис. 3. Интерфейс программы управления фотополяриметром. (а) — в режиме фотополяриметрии, (б) — в режиме спектрополяриметрии с призмой Аббе.



**Рис. 4.** Оптическая схема адаптера светосилы и его внешний вид в корпусе для монтирования на фланце. Кольцевая гайка с отверстиями используется для фиксации тубуса при установке.

решке и перемещается вдоль линии смыкания створок, расположенных под углом  $30^\circ$  к фокальной плоскости. Он имеет квадратный вырез на линии смыкания створок, соответствующий размеру поля, которое открывается при широкопольных наблюдениях. На тыльной стороне зеркальных створок расположена пружинистая шторка с «ключиком» и продольной прорезью в нем (перпендикулярной щели) для выделения фрагмента поля высотой  $10''$ , его ширина при этом определяется раскрытием щели от  $1''$  до  $10''$ . Уголок в изгибе («ключике») шторки размещен в желобе, образованном фасками на краях створок, и максимально приближен к фокальной плоскости, созданной оптической схемой и проходящей через щель при сомкнутом положении створок. Раскрытие щели несколько (некритично) выводит их из фокальной плоскости. При этом реализуются три варианта поля зрения:

- широкое поле —  $1' \times 1'$ ,
- длинная щель —  $1'' \times 60'' - 10'' \times 60''$ ,
- короткая щель —  $1'' \times 10'' - 10'' \times 10''$ .

Оптические узлы, обеспечивающие работу прибора в этих режимах, выполнены в виде отдельных блоков, перемещающихся в светозащищенном корпусе вдоль направляющих перпендикулярно оптической оси без нарушения юстировки, когда нужный блок находится на оптической оси прибора. Их смена происходит примерно за 1 с. В настоящее время в состав прибора входят два блока — для последовательной *BVR*-фотометрии и для спектроскопии с призмой Аббе.

Все манипуляции с оптическими блоками отображаются графическим интерфейсом программы управления, экран которого показан на рис. 3. Фотополяриметр функционирует на линии с четырьмя компьютерами. Первый и второй управляют

оптико-механическими узлами прибора, анализом поступившей информации и выбором режимов наблюдений, по сути являясь его интеллектуальным центром, третий принимает информацию от системы подзора поля, четвертый функционирует на линии с EMCCD-камерой. Использование такого набора позволяет одновременно выполнять все перемещения и регистрацию данных от обеих матриц.

### 3. УСТАНОВКА ФОТОПОЛЯРИМЕТРА НА БАЛКОНЕ ФОКУСА Н1 БТА

Конструкция разрабатываемого прибора близка к таковой у фотометра-поляриметра MPPP первичного фокуса (см. Plokhotnichenko et al. (2021)). Однако при использовании прибора в фокусе Нэсмита, имеющем расстояние 180 м, необходимо уменьшать фокусное расстояние до 24 м (как в ПФ). Для этого разработан и изготовлен адаптер светосилы, оптическая схема и внешний вид которого показаны на рис. 4.

При наблюдениях с длительным накоплением данных, для чего и предназначен созданный прибор, принципиально важна компенсация вращения поля зрения, реализованная в первичном фокусе. В противном случае необходимо корректировать положение объекта в ручном режиме каждые 3–5 минут в зависимости от его зенитного расстояния, что неприемлемо для любого автоматизированного прибора. Для решения этой задачи используется поворотная платформа компании STANDA 8MRB150-350-60<sup>8</sup>, установленная между лабораторным фланцем и фотополяриметром, как показано на рис. 1, или отдельно на рис. 5.

<sup>8</sup>[http://www.standa.lt/products/catalog/motorised\\_positioners?item=624](http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=624)



Рис. 5. Поворотная платформа STANDA 8MRB150-350-60.

Управление платформой осуществляется шаговым двигателем с помощью контроллера-преобразователя USB-RS232, подключаемого к интерфейсному компьютеру. Программное обеспечение функционирует на двух уровнях. Первый обеспечивает автономную работу с использованием инструментальной программы, поставляемой фирмой-изготовителем, которая позволяет проводить настройки режима работы платформы и запускать исполнительный скрипт, каждые 10 с считывающий файл со значением угла установки стола, и исполняющий движение к нему. Второй уровень обеспечивает взаимодействие с программой пользовательского интерфейса управления прибором, которая каждую секунду заносит в этот файл значение угла установки (рис. 3), получая его от программы управления телескопом. При этом возможна коррекция этого угла в соответствии с необходимостью, вытекающей из условий наблюдений.

ФПВВР, установленный в фокусе Н1 6-м телескопа БТА, показан на рис. А.2 (см. Приложение).

#### 4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФОТОПОЛЯРИМЕТРОМ

Для управления ФПВВР используются два компьютера. Один (инструментальный) обеспечивает функционирование всех электромеханических узлов с помощью специального контроллера управления кинематикой ФПВВР, другой (интерфейсный) предназначен для поддержания связи с прибором при выборе режима наблюдений. Прибор может работать в ручном и роботизированном режимах.

Ручное управление фотополяриметром осуществляется с помощью графического интерфейса (рис. 3), позволяющего устанавливать в рабочее положение зеркально-щелевой узел, нужный

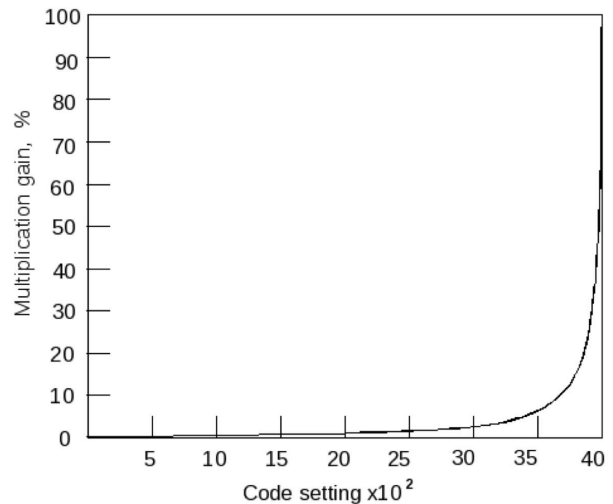


Рис. 6. Экспоненциальная зависимость умножения в детекторе EMCCD PhotonMax 512В от управляющего 16-разрядного кода цифро-аналогового преобразователя по результатам лабораторных измерений.

оптический блок, открывать и закрывать затвор прибора, выставлять на оптическую ось экран засветки плоского поля, а также выполнять другие манипуляции с прибором.

Взаимодействие между программами инструментального и интерфейсного компьютеров производится набором символьных команд, передаваемых по протоколу TCP/IP в локальной сети.

Для роботизированного управления на интерфейсном компьютере работает программа взаимодействия с внешней интернет-средой для получения целеполагания и выработки сценария наблюдений, см. Раздел 8.

#### 5. ТЕСТИРОВАНИЕ БЛОКА РЕГИСТРАЦИИ НА БАЗЕ EMCCD-КАМЕРЫ

Выходной узел ПЗС выполнен в виде двух независимых регистров считывания. Один используется при считывании сигнала, как в обычных ПЗС-системах, другой работает в режиме электронного умножения (ЕМ) заряда. При работе в режиме без умножения (нормальный режим) среднеквадратичное значение шума считывания составляет  $45e^-$  и  $60e^-$  при частотах считывания 5 и 10 МГц соответственно. При максимальном умножении шум считывания падает до значений ниже  $1e^-$ . Коэффициент умножения может программно задаваться в диапазоне от 1 до 1000. Зависимость величины умножения (напряжения на фазе умножительного регистра) от управляющего 16-разрядного кода цифро-аналогового преобразователя близка к экспоненциальной (рис. 6). Максимальное значение



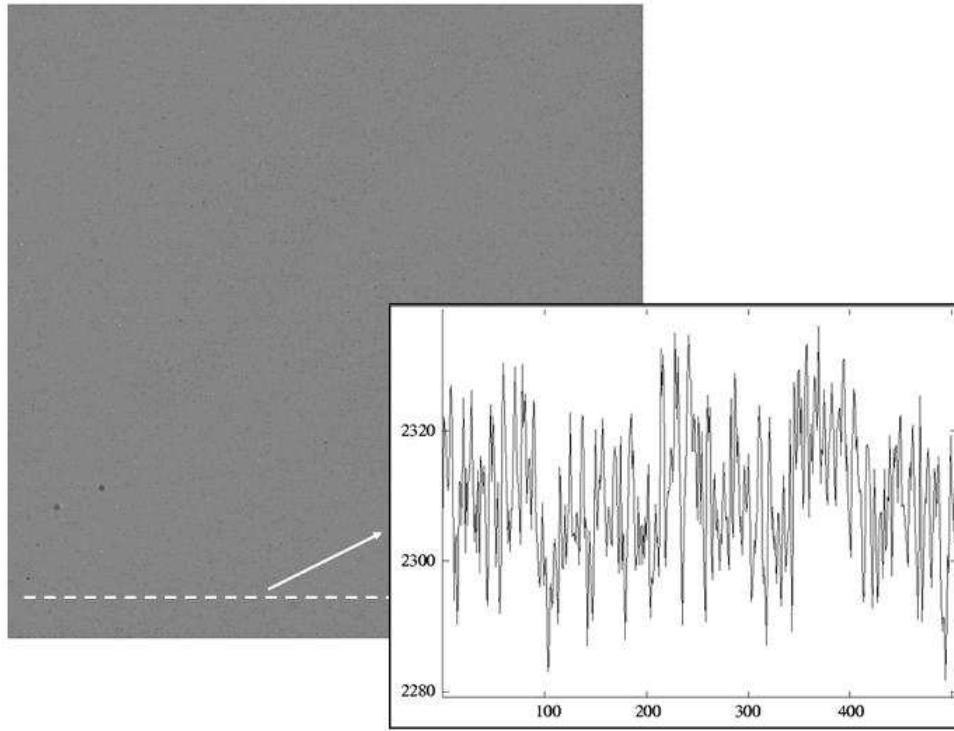


Рис. 7. Изображение и поперечный разрез отклика на постоянную засветку (плоского поля) детектора EMCCD PhotonMax 512В по результатам лабораторных измерений.

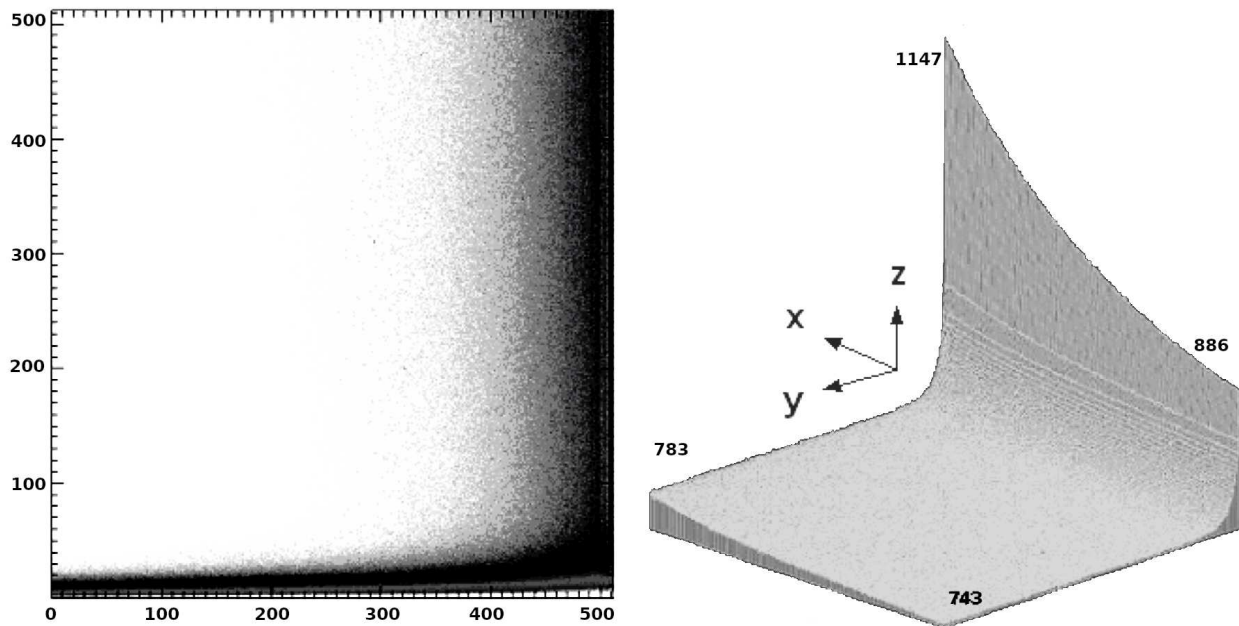
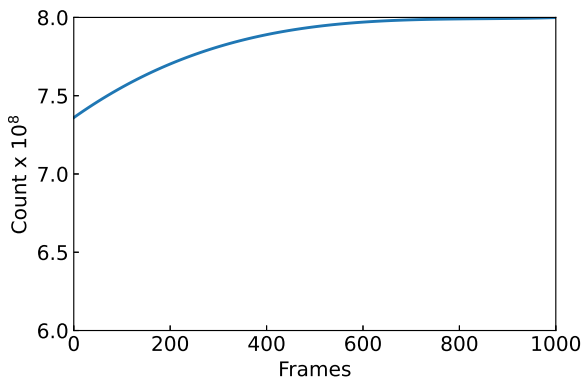


Рис. 8. Изображение уровня подложки детектора EMCCD PhotonMax 512В по результатам лабораторных измерений.

усиления достигается при напряжении примерно 43 В на фазе умножительного регистра матрицы.

Для уменьшения темнового тока матрица охлаждается четырехкаскадным холодильником на элементах Пельтье. Требуемая температура задается

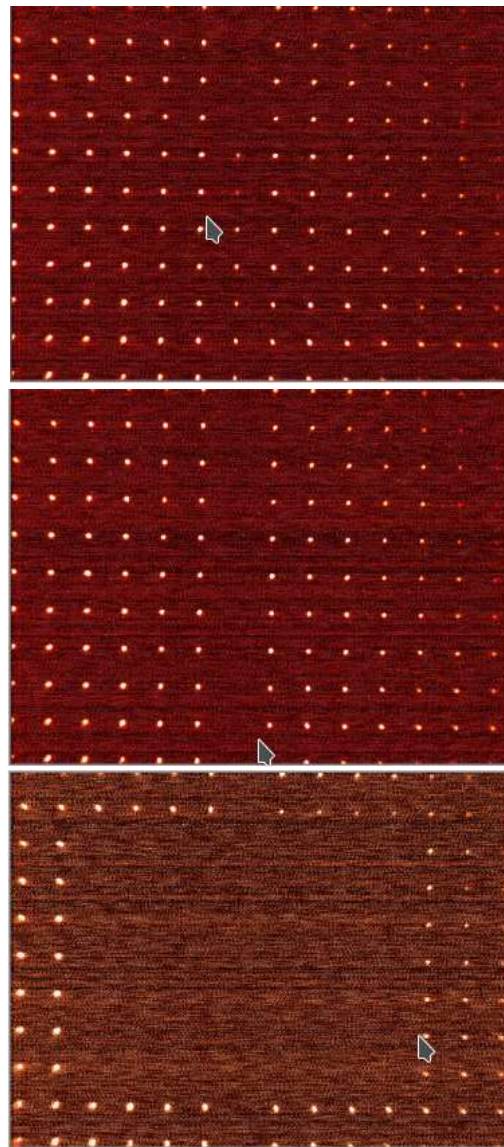
и поддерживается с точностью  $\pm 0^{\circ}05$  с помощью следящей системы с обратной связью. Минимальная рабочая температура составляет  $-70^{\circ}\text{C}$ . Темновой ток при этом снижается до величин ниже  $0.01\text{e}^-/\text{с}$  на элемент разрешения.



**Рис. 9.** Эффект «прогрева» — изменение сигнала с детектора EMCCD PhotonMax 512B со временем в условиях постоянной засветки. После накопления около 1000 последовательных кадров с экспозициями 10 мс отклик детектора выходит на постоянное с достаточной точностью значение.

Камера может работать в режиме кадрового переноса в широком диапазоне экспозиций от 10 мкс до 10 мин. Максимальная скорость считывания при полнокадровом режиме составляет 29 кадров в секунду. Матрица имеет внутренний электронный затвор, поэтому отпадает необходимость в использовании высокоскоростного электромеханического затвора, определяющего время экспозиции. Тестирование приемника излучения проводилось в лабораторных условиях с целью проверки заявленных производителем параметров устройства, определения его шумовых характеристик, а также выбора оптимального режима его работы. Оно показало, что в целом параметры детектора (предельно достижимая кадровая частота при различных размерах рабочей области кадра, шум считывания и шум усиления, стабильность и линейность отклика, уровень пространственной неоднородности чувствительности, и другие) соответствуют заявленным. На рис. 7 и рис. 8 приведены примеры результатов тестовых испытаний. Было отмечено наличие эффекта «прогрева» детектора — постепенного нарастания чувствительности (уровня отклика на постоянную засветку) сразу после включения приемника, с выходом на постоянный уровень спустя несколько минут после начала серии экспозиций (рис. 9).

По результатам лабораторного тестирования был выбран оптимальный режим работы детектора, который в дальнейшем будет проверяться и оптимизироваться по результатам реальных наблюдений на телескопе.



**Рис. 10.** Поле зрения подмотора: (a) — с сомкнутыми створками зеркальной щели. (b) — с разомкнутыми (один ряд реперных точек попадает в щель). (c) — с установленным на оптической оси окном. Расстояния между реперными точками 15", их размер 1"5.

## 6. ТЕСТИРОВАНИЕ ФПВВР В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

### 6.1. Фотометрия и спектроскопия

Первым шагом при настройке оптической схемы прибора является проверка соответствия полей зрения подмотора и основной камеры. На рис. 10 приведено изображение точечной диафрагмы в различных конфигурациях щели, регистрируемое камерой подмотора, а на рис. 11 — зарегистрированное EMCCD изображение части диафрагмы после прохождения света через окно в щели. Наблюдается хорошее соответствие полей зрения

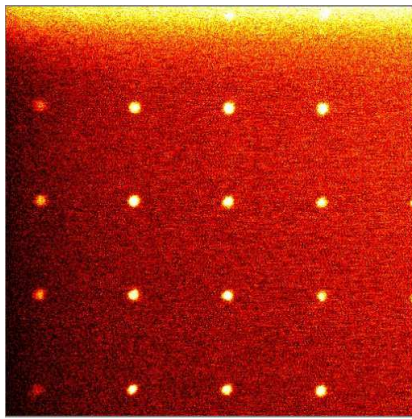


Рис. 11. Часть изображения диафрагмы после прохождения света через окно в щели (рис. 2 (4\*)), зарегистрированная EMCCD.

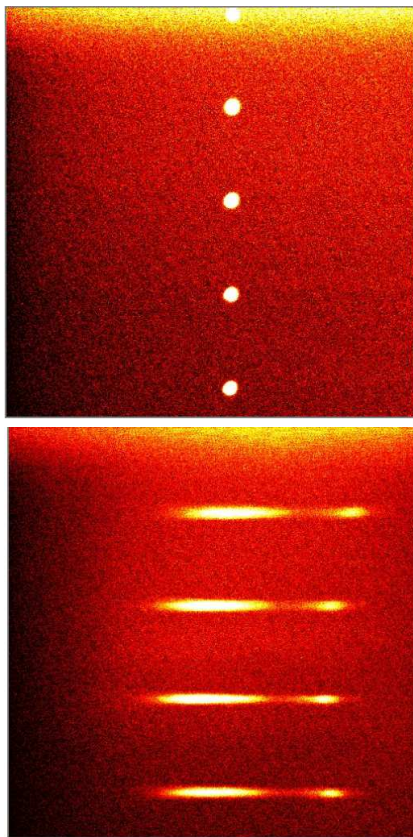


Рис. 12. Тестирование смены режимов фотополяриметра. Ряд точек репера, зарегистрированных в фотометрическом (а) и спектральном режимах (б).

подсмотра и основного детектора. Результаты проверки смены режимов наблюдений показаны на рис. 12.

Для определения эффективности работы прибора было измерено его пропускание с используемыми

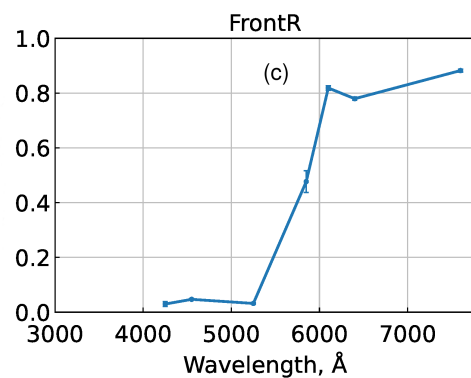
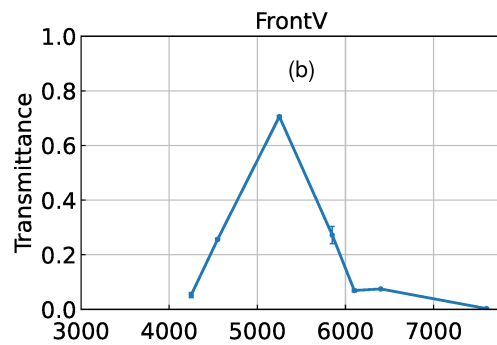
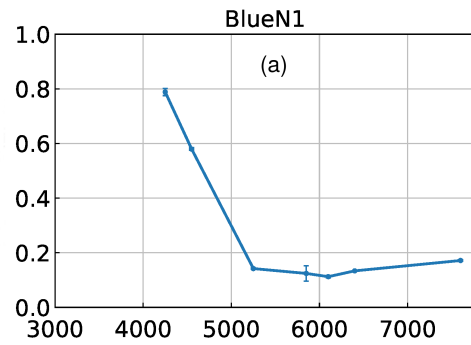


Рис. 13. Спектральные кривые пропускания ФПВВР для фотометрических *BVR*-полос (сверху вниз).

ми фотометрическими *BVR*-фильтрами. В качестве высокостабильных источников света использовались радиолюминесцентные излучатели (РЛИ) с известными спектральными характеристиками и максимумами излучения на длинах волн 425, 455, 525, 585, 610, 640, 760 нм. Поток от каждого из РЛИ последовательно регистрировался EMCCD-матрицей. Относительное светопропускание прибора определено как отношение величины «ослабленного» потока, проходящего через исследуемые оптические элементы по схеме «РЛИ → фильтр → EMCCD», к «полному» потоку, измеренному в схеме «РЛИ → EMCCD». Зависимости пропускания от длины волны приведены на рис. 13. Итоговые кривые пропускания с использованием звезд — спектрофотометрических

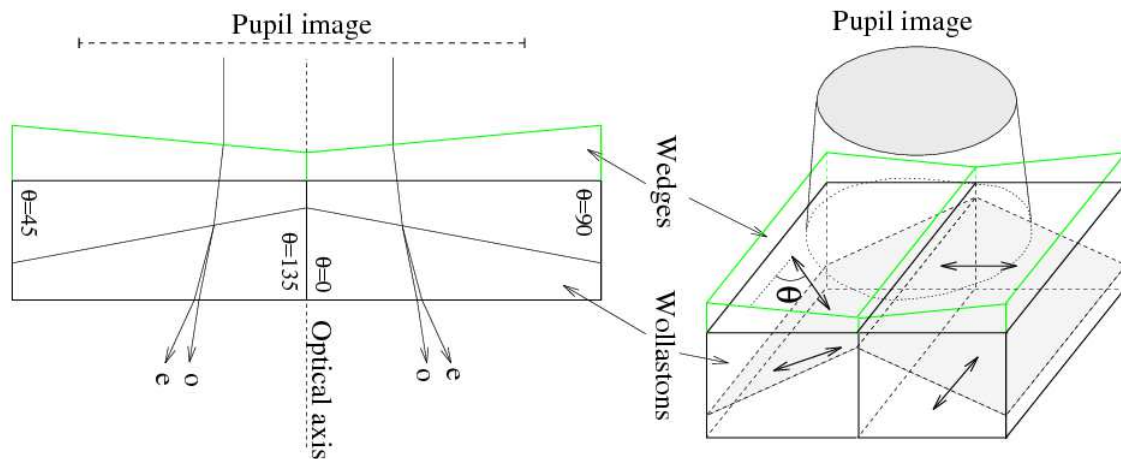


Рис. 14. Структура двойной призмы Волластона и разделение пучка света на поляризационные компоненты.

стандартов — будут получены в процессе тестовых наблюдений на БТА.

### 6.2. Поляриметрия

Для синхронного измерения трех параметров Стокса, т.е. для определения мгновенных значений степени линейной поляризации, в качестве поляризатора в приборе используется двойная призма Волластона с разводящими лучи оптическими клиньями (Oliva 1997), размещенная в параллельном пучке (после входного объектива коллиматора) (рис. 14). При этом поток излучения разделяется на две компоненты плоскостью склейки призм, каждая из которых в свою очередь расщепляет эти компоненты на два пучка с разными ориентациями плоскости поляризации. В конечном итоге выходная линза коллиматора формирует на фотокатоде ЕМССД четыре расположенные линейно изображения объекта (или его спектра), плоскости линейной поляризации которых ориентированы под углами  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $135^\circ$ . Размещение двойной призмы Волластона в функциональном блоке показано на рис. 2. Математическое описание значений нормированных параметров Стокса, вычисляемых по потокам квантов, регистрируемых фотополариметром от исследуемых объектов, выражается следующими формулами:

$$\begin{aligned}
 I &= E(0^\circ) + E(90^\circ) \\
 Q &= E(0^\circ) - E(90^\circ) \\
 I' &= E(45^\circ) + E(135^\circ) \\
 U &= E(45^\circ) - E(135^\circ),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $E(0^\circ)$ ,  $E(90^\circ)$  — интенсивности потоков квантов от исследуемого объекта, зарегистрированных

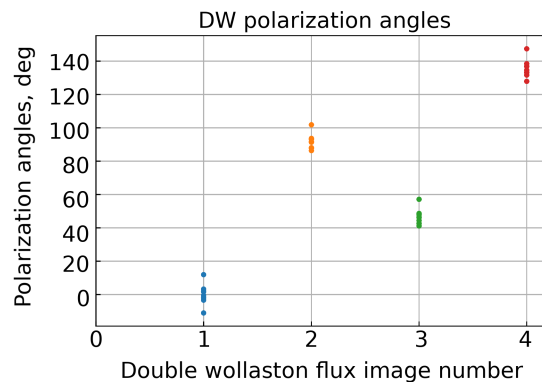


Рис. 15. Углы ориентации плоскостей поляризации в двойной призме Волластона. По вертикалям показаны разбросы величин углов для разных длин волн.

при двух взаимно перпендикулярных направлениях плоскости поляризации одной из призм лучей поляризатора,  $E(45^\circ)$ ,  $E(135^\circ)$  — такие же интенсивности, измеренные для второй призмы. При этом полная интенсивность потока излучения  $I_\Sigma = I + I'$ .

На рис. 15 приведены фактические углы ориентации плоскостей поляризации для различных компонентов, сформированных поляризатором пучков с разными эффективными длинами волн. Они довольно близки к паспортным значениям призмы.

После призмы Волластона свет проходит через фотометрический блок. Известно, что в отраженном от плоской поверхности пучке возникает линейно-поляризованная компонента. Оценки такого рода аппаратной поляризации в ФПВВР были получены с использованием РЛИ и вращающегося пленочного линейного поляризатора, управляемого шаговым двигателем, установленного в слабо

сходящемся пучке перед прибором. Собственный анализатор поляризации, двойная призма Волластона, с оси прибора убирался. Поляризация входного потока измерялась в соответствии с поворотами поляризатора при делении окружности на 50–250 фаз, в зависимости от интенсивности потока, а сам поток в каждом положении регистрировался с различными экспозициями ЕМССД. Детали этого исследования обсуждаются в работе Гутаева и коллег, которая готовится к печати. В конечном итоге, аппаратная поляризация составила 5–10% в разных фильтрах и практически не менялась со временем, что позволяет легко ее компенсировать при калибровке на поляризационные стандарты. Поскольку ориентация диагонального зеркала БТА относительно оптической оси телескопа совпадает с таковой относительно оптической оси в фотометрическом блоке ФПВВР, его вклад в аппаратную поляризацию также стабилен и близок к тем же нескольким процентам, что учитывается нормировкой на стандарты с нулевой поляризацией.

## 7. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РОБОТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ

### 7.1. Структура программного комплекса ФПВВР

ФПВВР представляет собой распределенную систему на основе программных модулей, установленных на нескольких компьютерах в локальной сети САО РАН (см. рис. 16). Отдельные модули обеспечивают низкоуровневое управление фотополариметром и поворотным столом, камерами подсмотра и сбора данных высокого временного разрешения, а также обеспечивают работу веб-интерфейсов подсмотра, сбора данных и управления системой в целом. Также реализованы инженерные пользовательские графические интерфейсы, предназначенные для ручного управления всеми функциями и режимами работы фотополариметра.

Модуль сбора данных представляет собой специализированное программное обеспечение (программный пакет FAST), разработанное нами для накопления данных с детекторов высокого временного разрешения типа ПЗС-матриц, КМОП-приемников и так далее. Особенностью этого модуля является его оптимизированная клиент-серверная многопоточная архитектура<sup>9</sup>,

<sup>9</sup> Модуль написан на низкоуровневом языке программирования С с целью обеспечения максимальной производительности.

позволяющая одновременно осуществлять накопление информации в непрерывном, без пауз между экспозициями, режиме высокой кадровой частоты, сохранять информацию на диск в стандартном FITS-формате, а также осуществлять с помощью веб-интерфейса визуальный контроль процесса (получать текущее и накопленное изображения, кривые изменения суммарного потока, и так далее, устанавливать режимы работы). Модуль принятия решений и управления в автоматическом (алертном) режиме обеспечивает корректное функционирование фотополариметра в условиях, когда требуется проведение оперативных наблюдений быстропеременных (транзиентных) событий при минимальном участии оператора, от которого требуется лишь принять решение об остановке текущих наблюдений на телескопе после получения информации о транзиентном событии, а также осуществить общий визуальный контроль корректности работы автоматического алгоритма выбора режима наблюдений в зависимости от погодных условий и параметров транзиента (его типа и яркости, точности имеющихся координат, и так далее). Модуль реализован на высокоуровневом языке программирования Python с целью обеспечения максимальной гибкости и простоты задания комплексных сценариев работы. Он предоставляет пользовательский веб-интерфейс, позволяющий оператору визуально контролировать состояние фотополариметра и весь процесс наблюдений.

### 7.2. GCN для телескопов САО РАН

Для сохранения и возможного использования сведений о GRB и других транзиентных событиях, распространяемых службой NASA GCN/TAN, в САО РАН разработана система сохранения и Web-представления истории GCN-событий. Она реализована на основе базы данных PostgreSQL. Регистрирующее программное обеспечение `gcn_db_monitor.py`, разработанное на языке Python, функционирует на сервере БТА (`tb.sao.ru`) и ведет прием, фильтрацию VOEvent-событий и запись полезной информации в базу PostgreSQL. Поскольку сервер БТА — «внутренний» без прямого выхода в Интернет, связь с GCN-сервером NASA осуществляется через ретранслятор `gcn_proxy.py`, работающий на сервере `relay.sao.ru`. Web-интерфейс этой базы данных написан на PHP. Ссылки на него находятся на сайтах БТА online<sup>10</sup> (Misc) и Zeiss-1000 online<sup>11</sup>. Образец таблицы событий показан на рис. 17.

<sup>10</sup> <https://www.sao.ru/tb/tcs/>

<sup>11</sup> [https://www.sao.ru/ztc/index\\_en.html](https://www.sao.ru/ztc/index_en.html)

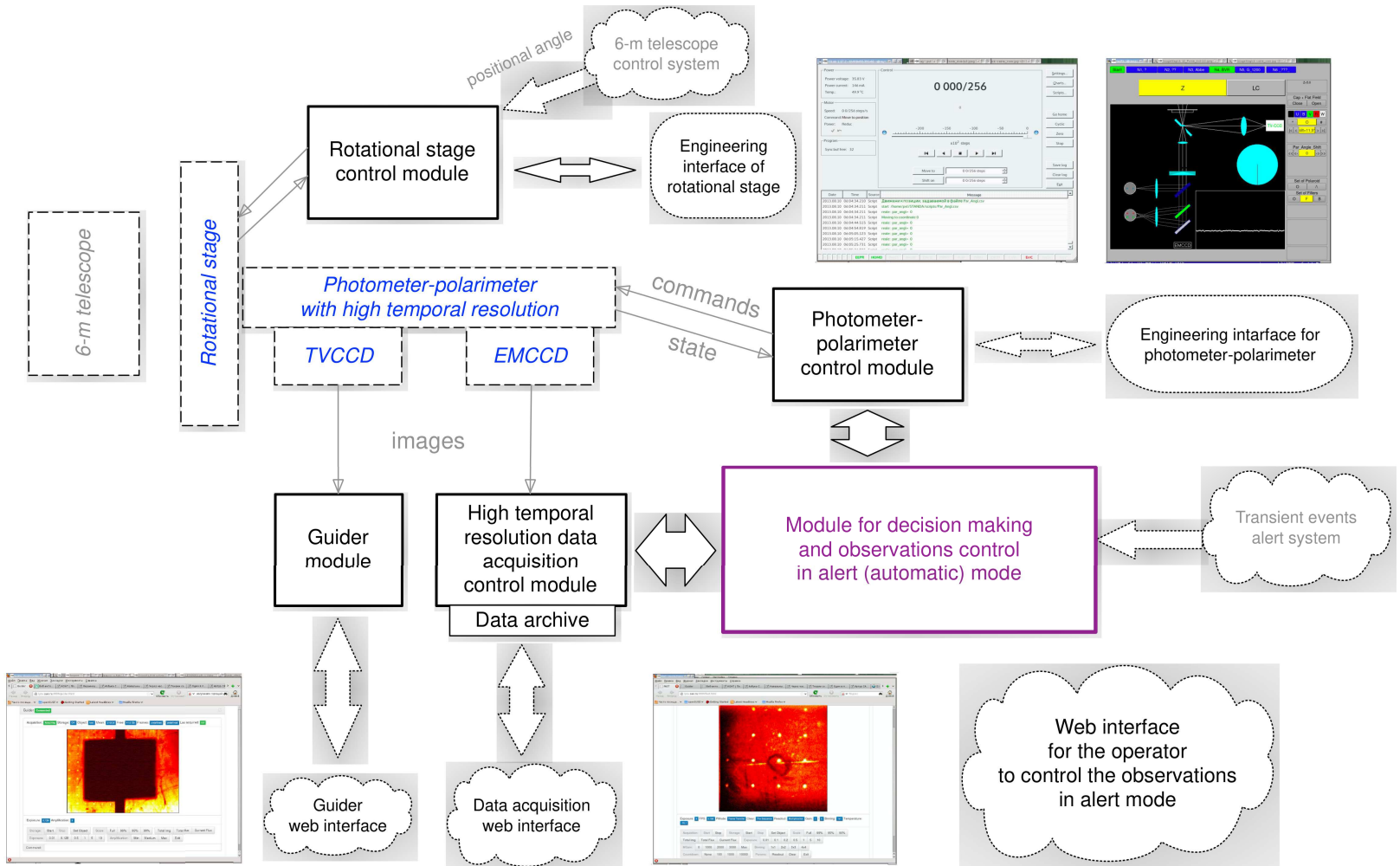


Рис. 16. Схема модулей математического обеспечения для управления и сбора данных фотополяриметра высокого временного разрешения.

**GCN/TAN events history** *(since 08-Feb-2020)*

Last  event records for

Local receive date	Source UTC date	Source	Instrument	TriggerId	GRB? Sigma	R.A.	Decl.	ErrRad	URL1	URL2	Full Source Name	Description	last VOEvent
2022-09-23 14:32:41.0	2022-09-23 11:32:22.4	Fermi	GBM	685625547	Yes 148.3	<a href="#">11:56:19.99</a>	<a href="#">+04:49:00.1</a>	3.8667°	<a href="#">LC</a>	---	Fermi Satellite, GBM Instrument	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>
2022-09-23 14:13:08.7	2022-09-23 11:12:44.9	Swift	XRT	1125106	Yes 5.38	<a href="#">09:02:36.31</a>	<a href="#">-40:43:01.6</a>	5.4"	<a href="#">LC</a>	---	Swift Satellite, XRT Instrument	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>
2022-09-23 14:11:00.6	2022-09-23 11:09:46.0	Swift	BAT	1125106	Yes 8	<a href="#">09:02:52.92</a>	<a href="#">-40:42:25.2</a>	3'	<a href="#">LC</a>	---	Swift Satellite, BAT Instrument	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>
2022-09-22 13:38:33.2	2022-09-22 06:45:29.8	AGILE	AGILE-MCAL	590913929	No 3.7	---	---	---	<a href="#">LC</a>	---	AGILE Satellite, AGILE-MCAL Instrument	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>
2022-09-22 02:25:31.5	2022-09-21 23:25:29.3	Fermi	GBM	685495534	Yes 4.2	<a href="#">02:17:16.01</a>	<a href="#">-65:37:59.9</a>	22.3667°	<a href="#">LC</a>	---	Fermi Satellite, GBM Instrument	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>
2022-09-22 01:54:46.0	2022-09-21 22:13:40	Counterpart	---	21514	Yes ---	<a href="#">04:28:36.60</a>	<a href="#">-39:48:25.9</a>	2.88"	---	---	GRB Afterglow Counterpart	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>
2022-09-21 21:01:22.1	2022-09-21 11:05:59.0	Fermi	LAT	685451164	Yes ---	<a href="#">04:27:09.60</a>	<a href="#">-40:15:00.0</a>	25.194'	---	---	Fermi Satellite, LAT Instrument	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>
2022-09-21 16:19:50.0	2022-09-21 11:05:59.0	Fermi	GBM	685451164	Yes ---	<a href="#">04:27:24.00</a>	<a href="#">-39:59:59.6</a>	1°	<a href="#">LC</a>	<a href="#">Plot</a>	Fermi Satellite, GBM Instrument	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>
2022-09-21 15:32:20.0	2022-09-21 11:06:01.7	IPN	WIND-KONUS	1984339961	No ---	---	---	---	<a href="#">LC</a>	---	InterPlanetary Network (IPN) System	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>
2022-09-21 15:32:19.9	2022-09-21 11:06:01.7	WIND	KONUS	1984339961	No ---	---	---	---	<a href="#">LC</a>	---	WIND Satellite, KONUS Instrument	<a href="#">ReadMe</a>	<a href="#">XML</a>

[Show next page...](#)

Рис. 17. Пример таблицы истории обнаружения объектов GCN.

Интерфейс позволяет просматривать либо все последние записи, либо только записи, касающиеся конкретного источника данных: спутника Swift, Fermi и других. Если VOEvent содержит координаты, то они представляются как ссылка на интерфейс просмотра текущего положения на небе.

Положение показывается для двух типов телескопов — альт-азимутального (БТА) и экваториального (Цейсс-1000). Интерфейс имеет связь с системами управления телескопами Цейсс-1000 и БТА САО РАН. Если источник подходит по точности координат и находится над горизонтом, внизу выводятся панельки для отправки координат в системы управления. Требуется только ввести пароль доступа. Есть возможность смещения по времени, чтобы днем наглядно увидеть, где источник будет находиться ночью, и спланировать наблюдения. Также можно посмотреть локализацию на небе с другой точки земной поверхности. Достаточно поставить галочку в окне с соответствующим запросом и заменить координаты (восточную долготу и северную широту) местонахождения САО РАН на другое положение наблюдателя.

### 7.3. Выполнение наблюдений

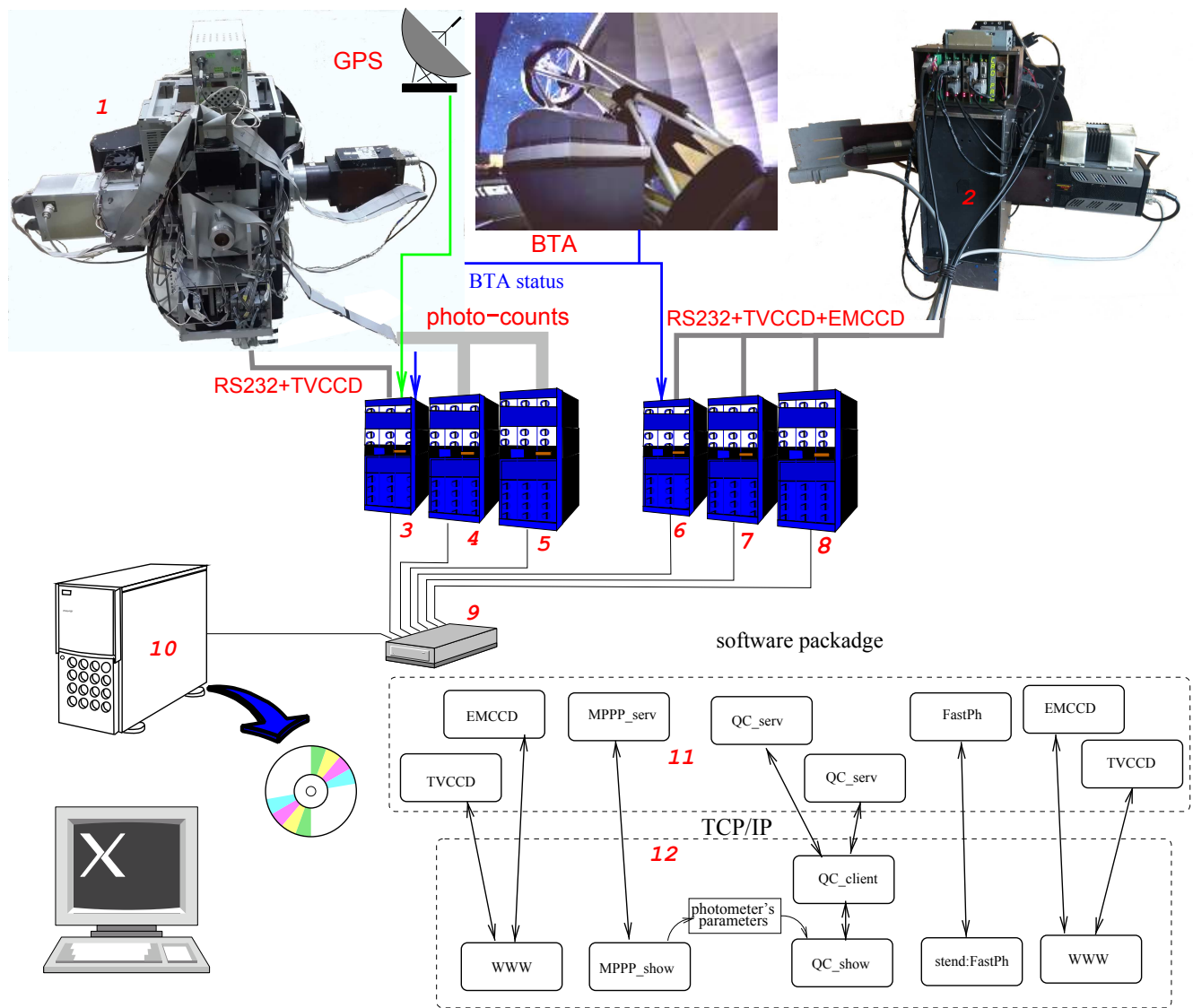
При наведении телескопа на выбранный объект после его обнаружения в рабочем поле с помощью коррекции ведения телескопа изображение объекта устанавливается на то место на щели, свет из которого после открытия щели попадает в блок цветоделительной оптики и анализатор поляризации, а затем — на регистрирующую матрицу. При этом регистрация кадров с изображениями рабочего поля на подсмотре ведется непрерывно, начиная от момента наведения телескопа в ожидаемое положение объекта и до прекращения сеанса работы. При «проваливании» объекта в канал регистрации, записываемый видеоряд подмотра при анализе данных наблюдений объекта может быть использован для слежения за состоянием неба и калибровки по соседним звездам, попадающим в это поле.

## 8. ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ ФПВВР И МРРР. ОБЩАЯ СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЕГО КОМПОНЕНТОВ

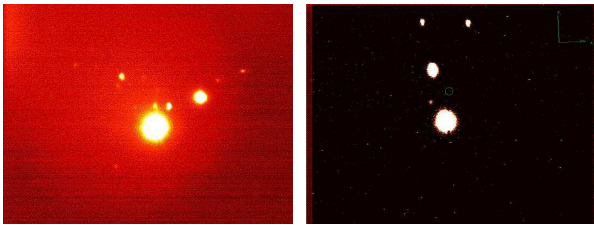
Для лучшей результативности обнаружения быстроперемennых объектов и большей полноты исследования их оптического излучения с высоким временным разрешением на 6-метровом телескопе на базе нового фотополариметра (ФПВВР) и штатного многомодового панорамного фотополариметра (МРРР) создан двухкомпонентный

инструментальный комплекс. Его структура показана на рис. 18. ФПВВР стационарно размещен в фокусе Нэсмита-1 БТА, а используемый на протяжении многих лет при выполнении наблюдательных программ МРРР перед выполнением плановых наблюдений с ним заранее устанавливается в стакане первичного фокуса. Сочетание этих инструментов позволяет решать одновременно две задачи, а именно — обнаруживать и исследовать оптические компаньоны неожиданно появляющихся транзиентных источников излучения любой природы (гамма- и радиовсплесков, гравитационно-волновых и нейтринных событий, вспышек объектов различного происхождения), информация о которых получена с помощью наземных и космических телескопов, а также детально изучать их свойства различными методами. Для решения первой задачи служит ФПВВР, который при реализации необходимых астроклиматических условий находится в состоянии готовности к наблюдениям. При получении сообщения о транзиентном событии на основании информации о его характеристиках устанавливается режим накопления данных и производится наведение телескопа на область локализации объекта. Эта процедура занимает от 3 до 15 минут, после чего начинаются наблюдения. При этом поле зрения прибора может представлять собой область размером примерно  $1' \times 1'$ , щель размером  $1'' \times 60'' - 10'' \times 60''$  либо диафрагму  $1'' \times 10'' - 10'' \times 10''$ ; выбор производится после накопления данных об объекте в подсмотровом канале с полем зрения  $2.5 \times 3'$ . Необходимо подчеркнуть, что именно большой размер поля зрения подмотра позволяет проводить поиски оптических транзиентов, компаньоны которых, обнаруженные другими инструментами не имеют точной локализации. Информация, полученная в подсмотровом канале, определяет и выбор собственно режима наблюдений — поочередную фотометрию в  $UBVR$ -полосах или спектроскопию с призмой Аббе (5–10 элементов разрешения) и возможность синхронного определения в этих модах трех параметров Стокса с помощью двойной призмы Волластона. Потоки излучения во всех режимах регистрируются с помощью EMCCD PhotonMax 512B с временным разрешением вплоть до 0.1 с. Накопленные данные сохраняются в памяти компьютера и анализируются в режиме квазиреального времени. На основании такой обработки программа управления комплексом (или наблюдатель) принимает решение о дальнейшем способе наблюдений. Здесь реализуются следующие два варианта. Если оптический компаньон транзиентного события не обнаруживается (на заранее определенном уровне блеска), телескоп возвращается к работе с МРРР по штатному расписанию. В случае же регистрации оптического





**Рис. 18.** Структура двухкомпонентного инструментального комплекса для поиска и исследования быстропеременных объектов 1 — многомодовый панорамный фотополариметр (МРРР); 2 — фотополариметр высокого временного разрешения (ФПВВР) для H-1; 3 — компьютер управления МРРР; 4, 5 — компьютеры сбора данных; 6 — компьютер управления; 8, 9 — компьютеры приёма данных от TVCCD-камеры подсмотра и регистрирующей матрицы EMCCD, 9 - сетевой переключатель выделенной линии; 10 — накопленные данные; 11 — компоненты аппаратных компьютеров; 12 — программные модули интерфейсных компьютеров, на которых производится накопление данных.



**Рис. 19.** Изображение звездного поля в подсмотре ФПВВР размером  $2'5 \times 3'5$  (а) в сравнении с тем же полем, практически одновременно полученным в ПФ на штатном подсмотре МРРР (б) при качестве изображения около  $2''$ .

объекта, координаты которого попадают в бокс ошибок исследуемого транзиента, его наблюдения продолжают в первичном фокусе БТА с помощью МРРР. Их вариант определяется яркостью объекта — для слабых источников (звездная величина более  $18^m$ ) оптимально использовать фотометрический режим с ЕМССД (при необходимости с измерением трех параметров Стокса), для относительно ярких — можно проводить *UBVR*-фотометрию или спектроскопию низкого спектрального разрешения (с призмой Аббе или решеткой 50–100 элементов разрешения) с микросекундным временным разрешением, синхронно регистрируя фотоны двумя координатно-чувствительными детекторами (КЧД), при необходимости одновременно определяя три параметра Стокса.

Первое тестирование двухкомпонентного комплекса для исследования быстропеременных объектов проводилось до приобретения поворотного стола. Были опробованы все режимы функционирования ФПВВР — регистрация большого поля на подсмотре, оценка яркости объекта (матрицы искусственных звезд и одиночного точечного источника), установка фотометрического и спектрального режимов при регистрации на ЕМССД, переход к фотоспектрополяриметрическим модам, контроль установки режимов и накопления данных. Затем был совершен переход к наблюдениям в первичном фокусе, который занял 10 минут. Были отработано использование различные режимов фотометрии, спектроскопии, поляриметрии при размещении объекта в широком поле диаметром  $1'$ , в щели ( $1'' \times 10''$ ) и диафрагме ( $10'' \times 10''$ ), а также их смена, продолжавшаяся 20–30 с, без коррекции положения источника. Регистрация излучения проводилась как с помощью ЕМССД, так и двумя КЧД с максимумами чувствительности в синей и красной областях спектра.

Пример согласования каналов проведения наблюдений показан на рис. 19.

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан фотополяриметр высокого временного разрешения (ФПВВР) для постоянного размещения в фокусе Н1 6-м телескопа БТА САО РАН. Он представляет собой полностью автоматизированный комплекс, способный работать в нескольких модах наблюдений для получения максимума возможной информации об исследуемом объекте с временным разрешением, по крайней мере, на уровне субсекунд. Дополнительные возможности дает работа нового прибора в комплексе с фотометром-поляриметром первичного фокуса МРРР (Plokhotnichenko et al. 2021)

Преимуществом, реализованным при создании ФПВВР, является унифицированность двух приборов. Конструкция ФПВВР, разработанная с учетом опыта создания МРРР, допускает его установку в первичном фокусе телескопа. Для этого достаточно снять с прибора редуктор светосилы, используемый для коррекции различий фокусных расстояний Н1 (180 м) и ПФ (24 м) при переходе к наблюдениям в другом фокусе. Обеспечена и обратная возможность монтирования МРРР на балконе Н1 — после установки адаптера светосилы — для выполнения дежурных наблюдений на фоне проведения основных программ. В этом случае система регистрации Квантохрон должна быть подключена к GPS-серверу времени через кабель, проложенный по штангам трубы телескопа к его входному торцу. Сама антенна должна устанавливаться на кабине первичного фокуса (найденное опытным путем наиболее подходящее место расположено над дверью кабины). При размещении антенны на балконе или на кольце телескопа синхронизация времени не удастся из-за малого количества одновременно видимых навигационных спутников. В таком варианте в сентябре 2017 года были проведены пробные синхронные наблюдения повторного радиобарстера FRB121102, а в апреле 2018 года — наблюдения миллисекундного пульсара (Tanashkin et al. 2022). Длительные наблюдения объекта 4FGL 1943+2841, проведенные в июле 2022 года, показали эффективность компенсации вращения поля поворотным столом STANDA<sup>12</sup>.

В рамках дальнейшего развития наблюдательных возможностей видеокамера подмотра рабочего поля VS-СТТ-285 заменена на цифровую ПЗС-камеру CSDU–285<sup>13</sup>. модели SONY ICX285AL с форматом кадра  $1392 \times 1032$  пиксел, разрядностью оцифровки 12 бит и частотой приема кадров 8 Гц. Размер пикселя равен  $6.45 \times 6.45$  мкм. Режимы сложения (биннинг) —  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$ . Скорость

<sup>12</sup>[http://www.standa.it/products/catalog/motorised\\_positioners?item=624](http://www.standa.it/products/catalog/motorised_positioners?item=624)

<sup>13</sup><http://www.sptt.ru/sptt/pdf/CSDU285.pdf>

передачи данных по интерфейсу USB 2.0 составляет 22 Мбайт/с. Замена видекамеры подзора позволила на 20% увеличить видимое поле.

В настоящее время выполняется модернизация прибора для работы с камерой iXon Ultra 888<sup>14</sup>. В ней также используется ПЗС-матрица с электронным умножителем (EMCCD). Размер сенсора — 1024 × 1024 с размером пикселей 13 × 13 мкм. При этом максимальная кадровая частота равна 26 Гц (1024 × 1024). Возможные режимы сложения (биннинг) — 2 × 2, 3 × 3, 4 × 4. Разрядность АЦП — 16 бит. Шум считывания не превышает 1e<sup>-</sup> (в режиме электронного умножения). Квантовая эффективность равна 0.9. Скорость передачи данных по интерфейсу USB 3.0 — 60 Мбайт/с. На рис. А.5 показана камера, установленная на ФПВВР.

Разработанные методы и средства позволяют выполнять широкий круг исследований экстремальных объектов в новом разделе науки — Time Domain Astronomy (Астрономия во временной области).

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Е. И. Перепелицына за расчет и изготовление адаптера светосилы и макетные мастерские САО РАН за изготовление деталей прибора.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России). Работа поддержана Европейским структурным и инвестиционным фондом и чешским Министерством образования, молодежи и спорта (проект CoGraDS CZ.02.1.01/0.0/0.0/15 003/0000437) и Федеральной программой повышения конкурентоспособности Казанского (При-волжского) Федерального университета.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

<sup>14</sup><https://andor.oxinst.com/assets/uploads/products/andor/documents/andor-ixon-ultra-emccd-specifications.pdf>

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al., *Phys. Rev. Lett.* **119** (16), id. 161101 (2017).
2. C. Barbieri, G. Naletto, T. Occhipinti, et al., *J. Modern Optics* **56** (2), 261 (2009).
3. P. Collins, G. Kyne, D. Lara, et al., *Experimental Astronomy* **36** (3), 479 (2013).
4. R. Coppejans, A. A. S. Gulbis, M. M. Kotze, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **125** (930), 976 (2013).
5. V. Dhillon, S. Dixon, T. Gamble, et al., *SPIE Conf. Proc.* **10702**, id. 107020L (2018).
6. L. K. Harding, G. Hallinan, J. Milburn, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **457** (3), 3036 (2016).
7. G. Kanbach, A. Stefanescu, S. Duschka, et al., *AIP Conf. Proc.* **984**, pp. 32–40 (2008).
8. L. Mankiewicz, T. Batsch, A. Castro-Tirado, et al., *Revista Mexicana Astronomia Astrofisica Conf. Ser.*, **45**, 7 (2014).
9. B. Mazin, J. Bailey, J. Bartlett, et al., *Bull. Amer. Astron. Soc.* **51**, 17 (2019).
10. B. A. Mazin, S. R. Meeker, M. J. Strader, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **125** (933), 1348 (2013).
11. F. Meddi, F. Ambrosino, R. Nesci, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **124** (915), 448 (2012).
12. E. Oliva, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **123**, 589 (1997).
13. V. L. Plokhotnichenko, G. M. Beskin, V. G. de Boer, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 472 (2021).
14. R. W. Romani, A. J. Miller, B. Cabrera, et al., *Astrophys. J.* **563** (1), 221 (2001).
15. O. H. W. Siegmund, J. McPhate, A. Tremsin, et al., *AIP Conf. Proc.* **984**, pp. 103–114 (2008).
16. A. Tanashkin, G. Beskin, S. Karpov, et al., in *Proc. VAK-2021 conf. on Astronomy at the epoch of multimessenger studies, Moscow, Russia, 2021*, Ed. by A. M. Cherepashchuk, N. V. Emelyanov, A. A. Fedorova, et al., pp. 299–301 (Janus-K, Moscow, 2022).
17. P. Verhoeve, D. D. E. Martin, R. A. Hijmering, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2), 598 (2006).
18. G. G. Williams, P. A. Milne, H. S. Park, et al., *AIP Conf. Proc.*, **1000**, pp. 535–538 (2008).

## ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис. А.1. Зеркально-щелевой узел ФПВР. Вид сзади.



Рис. А.2. Фотополяриметр (ФПВР), установленный в фокусе Н1 БТА (сверху — вид с торца, снизу — вид сбоку).

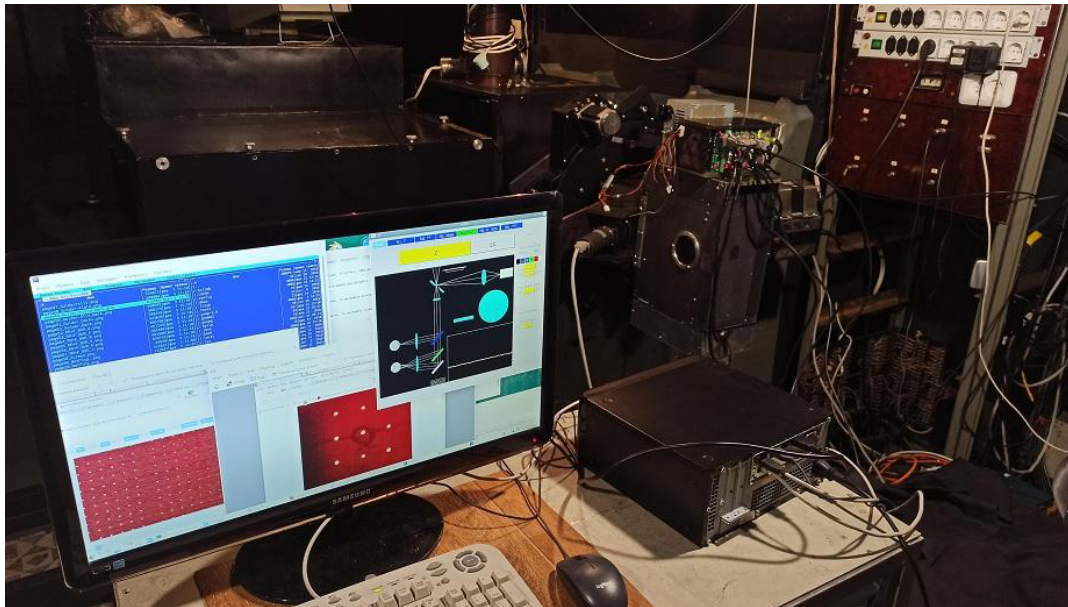


Рис. А.3. Локальный пульт управления ФПВР на балконе фокуса Н1 БТА.



Рис. А.4. Цифровая камера CSDU-285 SONY ICX 285AL для подмотра рабочего поля.



Рис. А.5. Камера iXon Ultra 888, смонтированная на фотополяриметре высокого временного разрешения.

### Automated Panoramic Photopolarimeter of High Time Resolution of the BTA N1 Focus

V. L. Plokhotnichenko<sup>1</sup>, G. M. Beskin<sup>1,2</sup>, S. V. Karpov<sup>1,2,3</sup>, V. S. Shergin<sup>1</sup>, E. P. Gorodovoy<sup>1</sup>,  
A. G. Gutaev<sup>1,2</sup>, A. P. Lyubetsky<sup>1,4</sup>, V. V. Pavlova<sup>4</sup>, V. N. Chernenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

<sup>3</sup>Central European Institute for Cosmology and Fundamental Physics, Institute of Physics,  
Czech Academy of Sciences, Prague, 18221 Czech Republic

<sup>4</sup>OOO Engineering Bureau "CEVLAP", Rostov-on-Don, 344065 Russia

The design and functions of the main component of the automated complex for the study of astrophysical objects with high time resolution at the 6-m telescope of SAO RAS—a permanently available photopolarimeter installed at the N1 focus of the BTA for alert observations of optical transient sources are described. The device operates in several modes (up to six in perspective)—spectral, polarimetric, photometric, the choice of which is determined after real-time analysis of the image of the object localization area, recorded in the subview with a field of view of  $2'.5 \times 3'$ . The radiation from the vicinity of the detected source is transferred to a diaphragm of variable size from  $10'' \times 10''$  to  $60'' \times 10''$  and, depending on its brightness, passed through one of the *UBVR* filters or dispersed by the Abbe prism, is recorded by the EMCCD with a time resolution of 0.1 s. In this case, it is possible to introduce a double Wollaston prism into the input beam, which ensures the measurement of the object's linear polarization. To compensate for the rotation of the instrument's field of view during observations on the balcony of the N1 focus, a turntable is used, the position of which is set by the telescope's control system. Control of the observation process, selection and change of modes is carried out using a graphical interface. The automatic implementation of these operations is being tested.

Keywords: *instrumentation: detectors—instrumentation: photometers—instrumentation: polarimeters*