

Система управления редуктора светосилы SCORPIO-2

© А. Е. Перепелицын¹, В. Р. Амирханян^{1,2}, А. В. Моисеев¹

¹САО РАН, пос. Нижний Архыз, Россия

²ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

Реферат

Во время астрофизических наблюдений нередко возникает потребность оперативной смены техники наблюдений на телескопе — например, переход от фотометрии к спектроскопии. Многорежимные приборы, при изменении оптической схемы, позволяют с минимальными временными потерями переключаться между различными методами исследований. Правильно построенная и автоматизированная система управления в таких инструментах играет важную роль. В настоящей работе описывается система управления многорежимного редуктора светосилы SCORPIO-2, работающего в первичном фокусе 6-метрового телескопа САО РАН.

Представлена типичная архитектура системы, позволяющей осуществлять удалённые наблюдения. Детально разбираются принципы функционирования редуктора на аппаратном уровне, в частности, устройство прецизионного блока с фазовыми поляризационными элементами, предназначенного для высокоточных поляриметрических измерений. Рассматриваются некоторые конструктивные особенности редуктора, а также схема управления его отдельными узлами, реализованная на микропроцессорах. Управление наблюдательным комплексом «SCORPIO-2 + адаптер для калибровки и гидирования + интерферометр + детектор + телескоп» осуществляется при помощи компактного компьютера, встроенного в корпус редуктора светосилы. Кратко описываются особенности пакета программ, написанного для управления наблюдательным комплексом на языке программирования IDL.

Создана распределённая система управления экспериментом, позволяющая из единого центра управлять разными инструментами: многорежимным редуктором светосилы, системой калибровки и внеосевого гидирования, системой регистрации изображений, системой архивации наблюдательных данных и телескопом. Система управления редуктора светосилы позволяет собрать в одном блоке все элементы прибора, сократив до минимума количество внутренних и внешних связей. Возможность быстрого переключения между различными режимами обеспечивает гибкость в выборе наблюдательных программ под текущее состояние атмосферы, тем самым экономится наблюдательное время.

Ключевые слова: наблюдательные инструменты, системы управления.

Контакты для связи: Перепелицын Александр Евгеньевич (09spec@gmail.com).

Статья поступила в редакцию 07.07.2020, принята к публикации 29.07.2020, опубликована 01.10.2020.

Для цитирования: Перепелицын А. Е., Амирханян В. Р., Моисеев А. В. Система управления редуктора светосилы SCORPIO-2 // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. С. 44–53.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.44-53>

The SCORPIO-2 Focal Reducer Control System

A. E. Perepelitsyn¹, V. R. Amirkhanyan^{1, 2}, A. V. Moiseev¹

¹Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, Russia

²Lomonosov Moscow State University, P. K. Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

Abstract

There is often need to quickly change the telescope instrumentation during astrophysical observations, for instance it is a switchover from photometry to spectroscopy. Multimode devices with a changeable optical scheme allow switching between different observational methods with a minimal time loss. A properly constructed and automated control system plays an important role here. In this paper, we review the control system of SCORPIO-2 multimode focal reducer operating in the primary focus of the 6-m SAO RAS telescope.

The typical architecture of the system allowing remote observations is presented. We summarize the principles of the focal reducer hardware level operation, the detailed design of a unit with phase-rotating elements for high-precision polarimetric measurements is considered. Some design features of the focal reducer and its individual units control scheme implemented on microprocessors are presented. The observational complex included 'SCORPIO-2 + calibration and guiding adapter + detector + telescope' is controlled by a compact computer built into the focal reducer body. The software package written on IDL to make remote control of the observational complex is briefly described.

We show one of the possibilities to create a distributed system allowing remote observations from a single point using different instruments: multimode focal reducer, calibration and off-axis guiding unit, image acquisition system, observational data archiving system and telescope. The focal reducer control system allows collecting all the device ele-

ments into a single block, minimizing internal and external connections. Quick switching between different methods provides flexibility of observational programs choice for the current state of the atmosphere, thereby saving observation time.

Keywords: instrumentation, observational tools, control systems.

Contacts: Alexander Perepelitsyn (09spec@gmail.com).

Received August 07, 2020, accepted August 29, 2020, published October 1, 2020.

For citation: Perepelitsyn A. E., Amirkhanyan V. R., Moiseev A. V. The SCORPIO-2 focal reducer control system // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 53. P. 44–53.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.44-53>

Введение

В стремлении наиболее полно исследовать астрономические объекты разрабатываются и создаются инструменты, позволяющие проводить наблюдения различными методами в широком диапазоне длин волн. Одновременное использование такого инструментария в наблюдениях сегодня стало естественным, но даже в сравнительно узком оптическом диапазоне лишь ограниченное число телескопов оснащено многомодовыми приборами, к примеру, DOLORES — на 3.6-м телескопе TNG на Канарских островах [1], EFOSC2 — на 3.6-м телескопе NTT в Чили [2], FORS2 — 8.2-м VLT в Чили [3] и некоторые другие. Оперативное изменение оптической схемы навесного оборудования позволяет с минимальными временными потерями вести наблюдения объекта различными методами. Это особенно актуально при исследовании быстротекущих процессов. Смены оборудования требует не только расписание наблюдений, но и текущее состояние атмосферы. Перечисленные аргументы послужили стимулом к разработке и изготовлению в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) в 2000 г. многорежимного фокального редуктора SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations) [4, 5]. Плодотворная идея замены отражательных решёток на прозрачные объёмные фазовые голографические (VPHG, Volume Phase Holographic Gratings) позволила соединить в сравнительно простой конструкции весьма противоречивые наблюдательные методы, такие как прямые снимки, длиннощелевая и многощелевая спектроскопия. С учетом опыта 10-летней эксплуатации этого прибора в первичном фокусе 6-м Большого Телескопа Азимутального (БТА) была разработана следующая версия редуктора — SCORPIO-2, в которой использованы достоинства и устранены некоторые недостатки первой версии. Были расширены наблюдательные возможности прибора, развиты его технические параметры, значительно увеличено число подвижных элементов, кроме того, SCORPIO-2 ориентирован на работу с ПЗС-приемниками большего формата [6]. Оптическая схема и механическая конструкция SCORPIO-2 разработаны В. Л. Афанасьевым (САО РАН), и под

его руководством прибор изготовлен в макетных мастерских САО РАН. Основу схемы составляют коллиматор и камерный объектив, а также различные сменные элементы: светофильтры, анализаторы поляризации, фазовые пластинки, дифракционные решётки и сканирующий интерферометр Фабри-Перо (ИФП). SCORPIO-2 позволяет проводить наблюдения протяжённых и точечных объектов в следующих режимах:

- длиннощелевая спектроскопия;
- прямые снимки в фотометрических системах Джонсона-Казинса UBVRI (UBVRI 1.25" — комплект фильтров, включающий 5 фильтров: Ultraviolet, Blue, Visual, Red, and Infrared), SDSS ugriz (Sloan Digital Sky Survey, ugriz is short for U-, G-, R-, I-, and Z-bands) и в узкополосных фильтрах;
- поляриметрия в широких фильтрах;
- спектрополяриметрия с «длинной щелью»;
- панорамная спектроскопия со сканирующим ИФП;
- панорамная спектроскопия с интегрально-полевым блоком IFU (Integral Field Unit).

В режиме IFU используется отдельный коллиматор, который вводится вместо основного. Детали схемы и методика работы в режиме панорамной спектроскопии с интегрально-полевым блоком рассматриваются в работе [7]. Текущая оптическая схема для каждого режима собирается системой управления и представлена на рис. 1. Оптика прибора рассчитана так, чтобы компенсировать кому и кривизну поля главного зеркала телескопа, что позволяет отказаться от использования в наблюдениях штатного непросветленного линзового корректора. Эквивалентная светосила редуктора в первичном фокусе БТА составляет F/2.6. Все оптические поверхности просветлены в диапазоне 360–1000 нм. Просветляющие покрытия нанесены в ООО «Опто-Технологическая Лаборатория», г. Санкт-Петербург [8]. Прибор периодически модернизируется, комплект сменных оптических элементов дополняется. Описание редуктора можно найти на сайте САО РАН на странице проекта [9].

SCORPIO-2 в первичном фокусе БТА используется в составе специального комплекса, который конструктивно можно разделить на четыре основные подсистемы, каждая из которых допускает

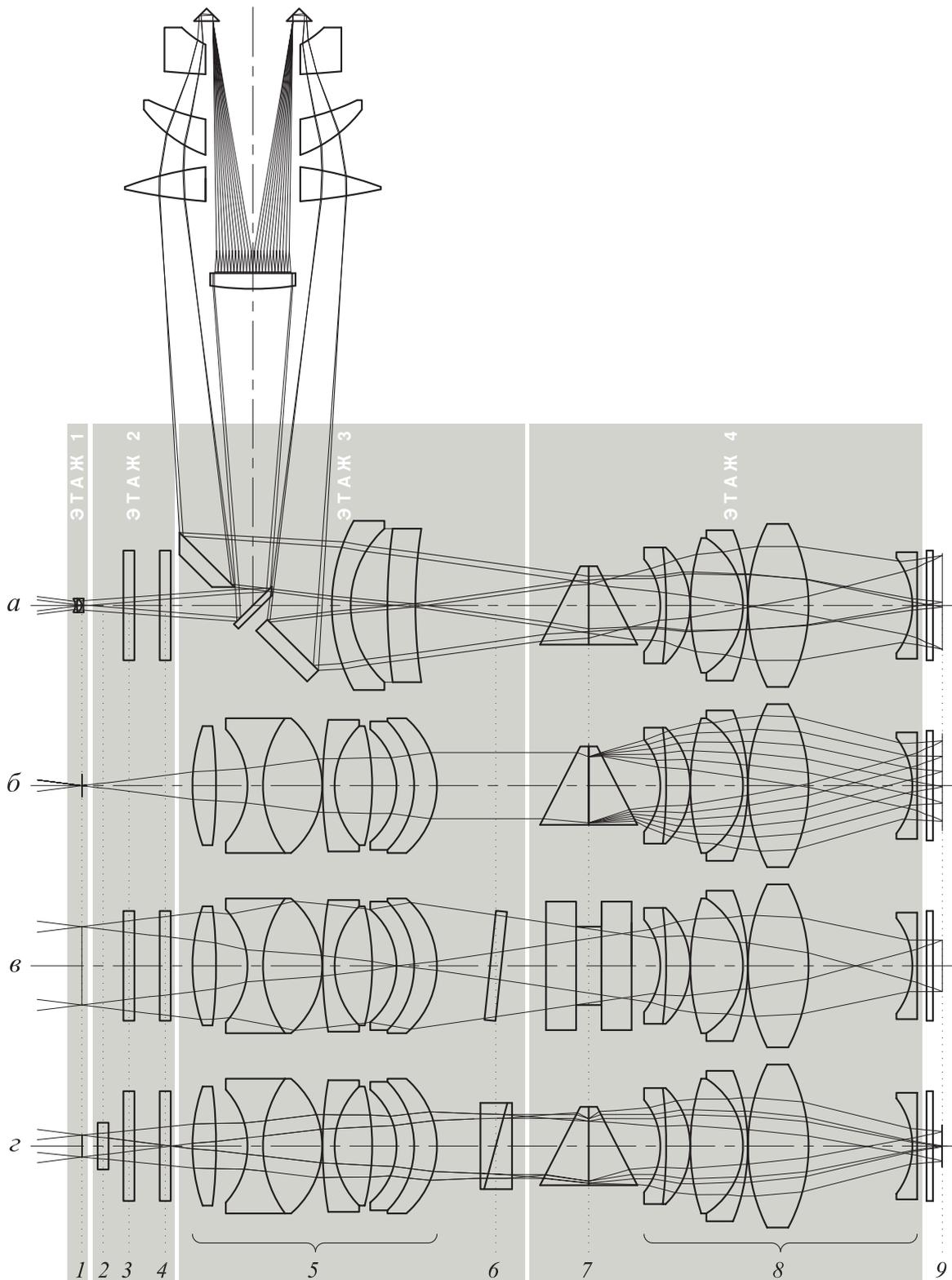


Рис. 1. Оптическая схема SCORPIO-2 в различных режимах: *а*) IFU; *б*) длиннощелевая спектроскопия; *в*) прямые снимки (при этом поз. 7 в схеме не используется) и сканирующий ИФП (при этом поз. 6 в схеме не используется); *г*) поляриметрия в широких фильтрах и спектрополяриметрия с «длинной щелью» (при этом щель вводится в поз. 1). Основные узлы: 1 — каретка, вводящая в фокальную плоскость блок увеличителей IFU, длинную щель, либо свободное отверстие для получения изображений; 2 — каретка вращающихся поляризационных элементов; 3 и 4 — две турели светофильтров; 5 — каретка смены коллиматоров, фокусировка; 6 — турель с фотометрическими фильтрами и призмами Волластона; 7 — турель с призмами и подвижка для ввода ИФП; 8 — камера с механизмом фокусировки; 9 — плоскость ПЗС-детектора

независимое использование: сам редуктор светосилы, система гидирования и калибровки — «адаптер», интерферометр Фабри-Перо и система регистрации изображений. Адаптер применяется как для внеосевого гидирования, так и для телецентрической засветки входного зрачка устанавливаемого на нем прибора различными калибровочными источниками света. Системе гидирования и калибровки посвящена отдельная подробная работа [10]. Эталон Фабри-Перо вводится в коллимированный пучок SCORPIO-2 при помощи специальной подвижки. Управление положением плоскопараллельных пластин эталона осуществляется при помощи внешнего контроллера. Режим панорамной спектроскопии со сканирующим интерферометром Фабри-Перо рассмотрен в цикле работ [11–13]. Система регистрации изображений состоит из нескольких модулей: криостата, поддерживающего рабочую температуру ПЗС-матрицы, контроллера, закреплённого на корпусе криостата и блока питания. В настоящее время совместно со SCORPIO-2 может использоваться одна из двух систем формата $2k \times 4k$: E2V CCD42-90, либо E2V CCD261-84. Полный комплект для наблюдений с ПЗС (криостат, электроника и программы управления) разработан и изготовлен в Лаборатории перспективных разработок САО РАН и описан в [14].

Особенности конструкции SCORPIO-2

Редуктор светосилы выполнен в виде отдельных блоков («этажей»), где размещаются оптические элементы, из которых собирается схема прибора, необходимая для текущих наблюдений. Этажи смонтированы в общем корпусе и расположены в следующем порядке по направлению от посадочного фланца прибора (рис. 1):

— Этаж 1 — каретка вводящая в фокальную плоскость следующие элементы: блок увеличителей IFU, длинную щель переменной ширины, свободное отверстие для получения изображений; ширина щели меняется в пределах $0.5\text{--}22''$, предусмотрено введение различных масок на щель;

— Этаж 2 — каретка вращающихся поляризационных элементов: $\lambda/2$, $\lambda/4$, поляририд; две турели светофильтров;

— Этаж 3 — каретка смены коллиматоров; механизм фокусировки коллиматоров; турель с наклонёнными в оправках фильтрами фотометрической системы Джонсона-Казинса и призмами Волластона;

— Этаж 4 — турель с гризмами VPHG; механизм ввода интерферометра Фабри-Перо; механизм фокусировки камеры.



Рис. 2. Модульная конструкция SCORPIO-2: 1-й этаж смонтирован на фланце и снимается вместе с ним; этажи 2–4 извлекаются из направляющих пазов при демонтированном блоке IFU и снятой верхней крышке; для модуля управления предусмотрена возможность быстрого извлечения (корпус прибора разбирать не нужно). На рисунке видны платы управления 2-м и 4-м этажами, а в правой части — разъёмы подключения общей линии питания и связи к этажам 1–3

На рис. 2 фокальный редуктор SCORPIO-2 показан с демонтированным блоком IFU и со снятой верхней крышкой, когда открыт доступ ко второму, третьему и четвёртому этажам, закреплённым в направляющих пазах. Первый этаж смонтирован на посадочном фланце прибора и демонтируется вместе с ним. Для реализации распределенной схемы управления редуктором каждый этаж оснащен локальным «мозгом» в виде микропроцессора (МП) AVR ATmega8535L (на рис. 2 видны платы управления 2-м и 4-м этажами). Общая линия питания и связи может быть отсоединена (в правой части рис. 2 видны подключенные к этажам разъёмы). Благодаря такой модульной конструкции есть возможность извлечь любой этаж из общего корпуса и работать с ним на столе, если требуется юстировка или ремонт.

Управление комплексом SCORPIO-2 + адаптер + ИФП на аппаратном уровне

Модуль управления SCORPIO-2

Модуль управления SCORPIO-2 (рис. 2) легко извлекается из корпуса редуктора и может работать с каждой подсистемой комплекса (адаптер / ИФП / ПЗС) в отдельности, а также с любым из этажей «на столе». Внутри этого модуля смонтированы компактные преобразователи напряжения марки Arch на 5 В и 12 В, которые обеспечивают питание всех элементов редуктора. Здесь же установлен компактный компьютер MR3253S00F, заменивший собой два внешних промышленных компьютера, работавших в составе комплекса до 2019 г. Его задачи: управление и контроль состояния редуктора, взаимодействие с ПЗС, сбор и хранение получаемой информации. Используемые ПЗС-системы подключаются по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), поэтому для согласования оптического сигнала с ethernet-портом компьютера в корпусе модуля управления размещены медиаконвертеры (рис. 3). Связь между компьютером и силовыми элементами модуля управления выполняет МП ATmega168, который отслеживает состояние всех элементов модуля, включая панель ручного управления и может самостоятельно либо по команде от внешней программы регулировать работу модуля. Панель ручного управления и коммутации SCORPIO-2 расположена на наружной панели модуля управления, куда выведено большинство тумблеров, индикаторов и разъёмов прибора. Кроме того, в панели предусмотрено окно, которое обеспечивает доступ ко всем разъёмам компактного компьютера и тумблерам ручного выключения каждого из преобразователей напряжения. Окно используется для отладки и настройки и в рабочем режиме закрыто крышкой.

SCORPIO-2 + адаптер

SCORPIO-2 содержит 42 сменных оптических элемента и 19 перестраиваемых элементов. Фокальный редуктор крепится к фланцу телескопа через адаптер. В комплексе работает 21 электромотор, текущее состояние контролирует 81 датчик. Энергоснабжение комплекса обеспечивают встроенные в редуктор и адаптер преобразователи напряжения, состояние которых также контролируется. Блок-схема электронной части и линий связи описываемой аппаратуры приводится на рис. 3. Чтобы обеспечить удаленное управление и контроль столь обширным набором устройств используется распределенная система, включающая 7 МП ATmega (5 в SCORPIO-2 и 2 в адаптере). В каждый микропроцессор загружена программа управления набором логически связанных устройств. Еще один МП ATtiny45 установлен на плате управления затвором. Он формирует им-

пульсы, необходимые для работы затвора и позволяет получать экспозиции в десятые доли секунды. Команды на ATtiny45 поступают от МП 3-го этажа по шине TWI (I²C).

Используемые микропроцессоры подобраны в соответствии с локальными задачами: МП ATmega обладают большим количеством портов ввода-вывода и необходимым набором дополнительных функций, ATtiny имеют ограниченный функционал, но меньшие габариты, и требуют минимум элементов обвязки. Получив команду от внешней программы, которая не противоречит текущему состоянию исполнительных элементов, программа микропроцессора приступает к ее выполнению, непрерывно контролируя при этом состояние соответствующих исполнительных устройств. Такое «разделение труда» позволило освободить внешнюю программу от лишней нагрузки, уменьшить обмен информацией и, тем самым, повысить надежность управления. Программы микропроцессоров построены так, что исполнение любой команды можно прервать из внешней программы.

Формат всех команд от внешней программы одинаков и состоит из четырёх байт. Первый байт — это константа 0×23 (в шестнадцатеричном виде), которая является признаком начала передачи команды от управляющей программы к МП. В четырёх старших разрядах второго байта содержится номер устройства, которому посылается команда; 4 младших разряда — номер исполнительного элемента в адресуемом устройстве. Третий и четвёртый байты определяют конкретные действия, которые должен совершить указанный элемент. Ответ любого микропроцессора также содержит 4 байта. Первый байт — 0×21 — признак начала ответа МП управляющей программе. Второй байт ответа повторяет второй байт запроса внешней программы, чтобы можно было понять от какого устройства пришёл ответ (на линии может находиться до 16 устройств). Третий и четвёртый байты содержат информацию о состоянии концевиков, датчиков положения, температуре, а также токах и напряжениях источников питания.

Конструктивно, схема управления этажом (микропроцессором и электронными компонентами, необходимыми для управления соответствующим набором исполнительных устройств) собрана на многослойной печатной плате, которая монтируется на данном этаже, рядом с исполнительными устройствами. Такая архитектура позволяет существенно сократить длину и количество коммуникаций, а также упрощает настройку и ремонт как схем управления, так и комплекса редуктор + адаптер в целом [15].

В качестве приводов использованы шаговые электродвигатели с вращающим моментом от 0.15 до 12 кг/см. Это надежные бесколлекторные моторы, которые работают в широком диапазоне

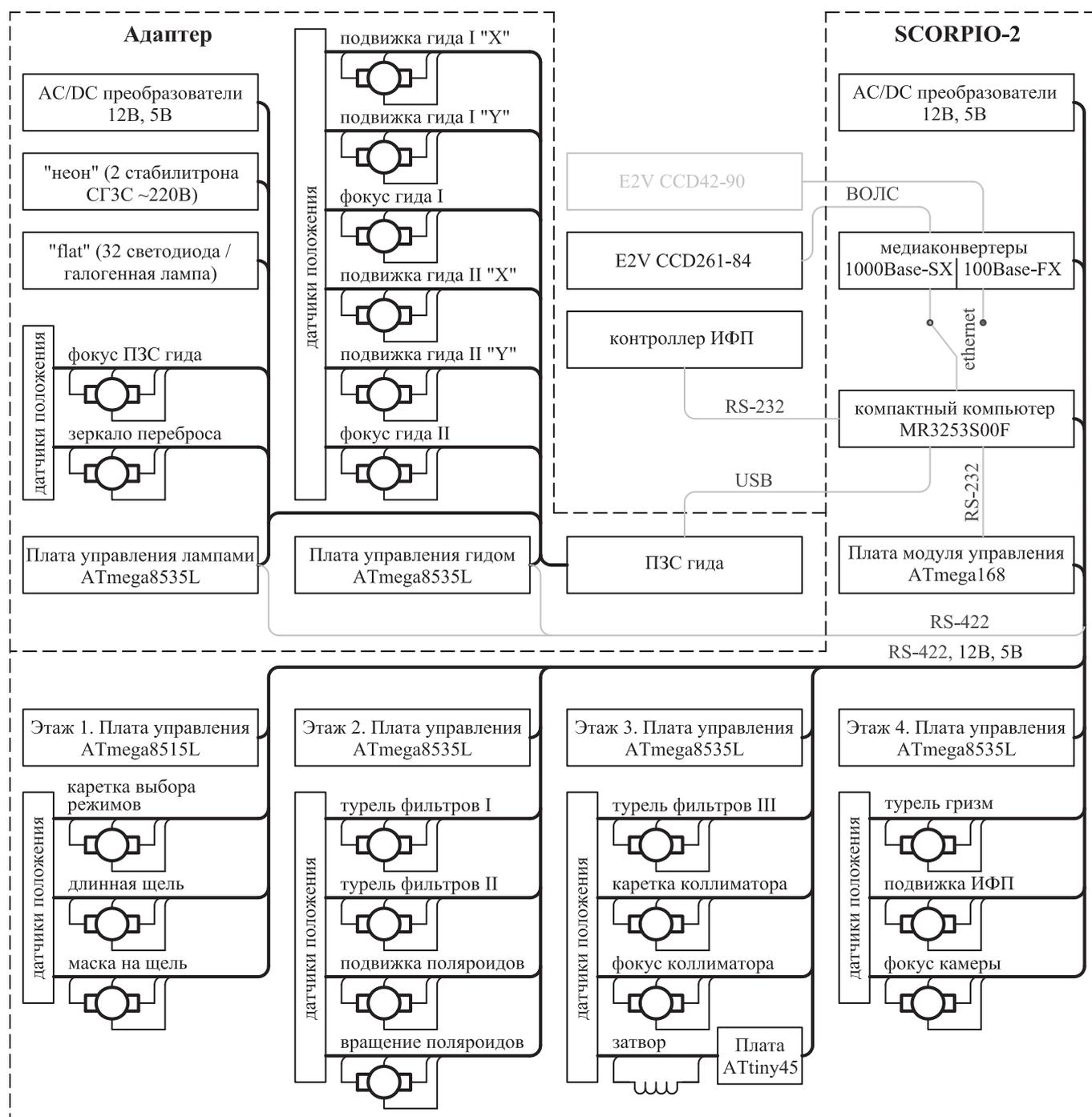


Рис. 3. Блок-схема управления электроникой SCORPIO-2 + адаптер и линий связи наблюдательного комплекса SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС. Серыми линиями показаны интерфейсы связи между узлами комплекса, чёрными — линии питания и прочие соединения электронных компонентов

скоростей (до 1000 шагов/сек), позволяют грубо контролировать позицию исполнительного механизма по всей траектории движения, просты в управлении, компактны. В узлах, где требуется осуществлять контроль позиции с высокой точностью, установлены потенциометрические датчики положения.

Связь МП адаптера и «этажей» редуктора с компактным компьютером реализована по четы-

рёхпроводной полнодуплексной линии RS-422. На плате модуля управления SCORPIO-2 интерфейс RS-422 преобразуется в RS-232, который соединен с одним из последовательных портов компьютера (рис. 3). Обмен информацией между микропроцессорами и внешней программой ведется с помощью стандартного протокола RS-232 и возможен только по инициативе внешней программы.

Особенности функционирования отдельного узла на примере прецизионного блока с фазовыми поляризационными элементами

Режимы поляриметрии и спектрополяриметрии строятся по схеме с поворачиваемыми фазовыми пластинами — рис. 1г 2 и неподвижным анализатором поляризации — рис. 1г 6, что позволяет проводить измерения и линейной, и круговой поляризации. В качестве анализаторов поляризации используются две призмы Волластона, которые вводятся в оптический тракт с помощью турели третьего этажа, с погрешностью установки не хуже $0.1'$.

Прецизионный блок установлен на втором этаже и содержит три фазовых поляризационных элемента: ахроматические $\lambda/2$ и $\lambda/4$ пластинки диаметром 30 мм и дихроичный анализатор (поляриод) диаметром 70 мм, пропускающий излучение только в одной плоскости поляризации. Все три элемента установлены во вращающихся оправках с зубчатыми венцами и поворачиваются одновременно шаговым двигателем через редуктор (рис. 4). Каждый фазовый элемент устанавливается в фиксированные позиции по углу поворота ($\lambda/2$: 0° , 22.5° , 45° , 67.5° ; $\lambda/4$: 0° , 90° ; поляриод: 0° , 60° , 120°) с механической фиксацией. Такая конструкция обеспечивает воспроизводимость установки угла поворота не хуже 0.02° . Индикация каждой позиции осуществляется датчиками Холла. Требуемый элемент вводится в световой пучок перемещением всей каретки с помощью шагового двигателя. Механизм имеет четыре фиксированные позиции, одна из которых пустая, с воспроизводимостью установки позиции не хуже 10 мкм. С методикой поляриметрических наблюдений на SCORPIO-2 можно ознакомиться в работе [16].

Интерферометр Фабри – Перо

Для работы со сканирующим пьезоэлектрическим ИФП в кабину первичного фокуса 6-м телескопа устанавливается дополнительный модуль — контроллер интерферометра CS100, который также связывается с компактным компьютером через интерфейс RS-232. Эталон ИФП помещается на своё посадочное место в подвижке редуктора и соединяется кабелем непосредственно с контроллером. Вводом эталона в световой пучок и выводом из него управляет микропроцессор четвёртого этажа (рис. 3). После ручной настройки интерферометра при помощи контроллера, управление переключается на последовательный порт и далее осуществляется удалённо. В режиме наблюдений используется всего две команды: смещение по «z» — изменение величины зазора между плоскопараллельными пластинами эталона — и инициализация контроллера.

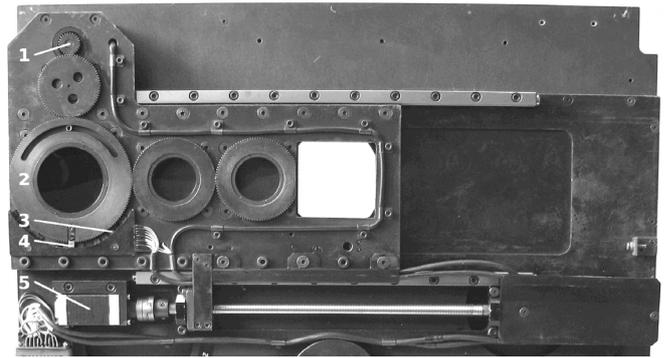


Рис. 4. Поляриметрический узел: 1 — вал двигателя, вращающего поляризационные элементы; 2 — оправка поляриода с зубчатым венцом, передающая вращение на оправы фазовых пластин $\lambda/2$ и $\lambda/4$; 3 — датчики Холла, по которым осуществляется индикация угловых значений текущего элемента; 4 — магнит; 5 — привод каретки

Пакет программ управления комплексом SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС

Формулировка «внешняя программа», применяемая выше, относится к приложениям операционной системы компактного компьютера, управляющим микропроцессорами редуктора и адаптера. Эти приложения являются частью пакета программ управления комплексом, написанных на языке программирования IDL (Interactive Data Language).

Все функции управления и контроля состояния комплекса собраны в удобную оболочку, также реализованную в среде IDL. Интерфейс управления комплексом и окно управления отдельными узлами SCORPIO-2 показаны на рис. 5 и 6 соответственно. После запуска программа каждую секунду опрашивает состояние всех семи микропроцессоров редуктора и адаптера.

Кратко коснёмся основных возможностей программы. В верхнем блоке главного окна (рис. 5) располагается меню управления экспозициями и архивацией получаемых данных. В средней части — меню переключения режимов наблюдений. При нажатии на любую из вкладок сразу начинается перемещение узлов редуктора, которые устанавливаются в положение, соответствующее последним наблюдениям в данной моде. На вкладке «Test» задаётся текущая конфигурация сменных элементов SCORPIO-2. Справа от меню переключения режимов отображается состояние узлов на всех четырёх этажах, а также текущее значение фокуса коллиматора и положение затвора. В нижнем блоке сгруппированы функции, управляющие узлами адаптера: калибровочными источниками линейчатого либо непрерывного спектра и зеркалом переброса, подвижками и фокусировкой световодов гида, а также фокусировкой ПЗС детектора

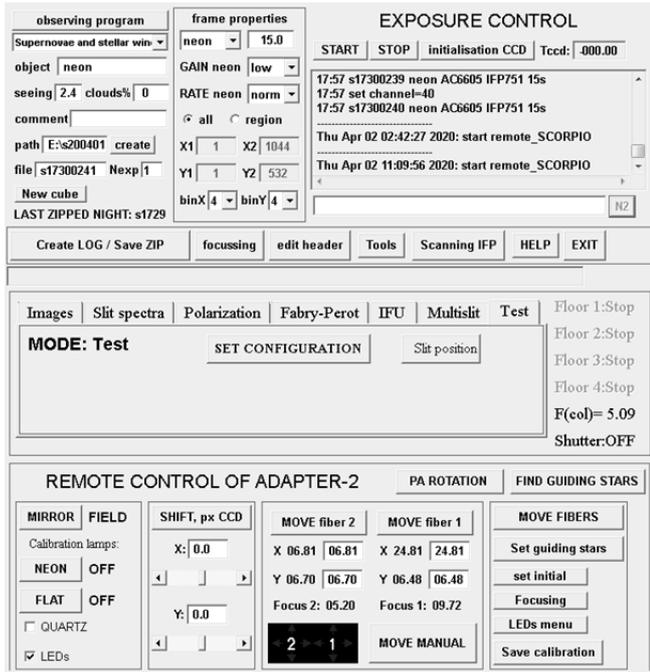


Рис. 5. Главное окно программы управления комплексом SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС

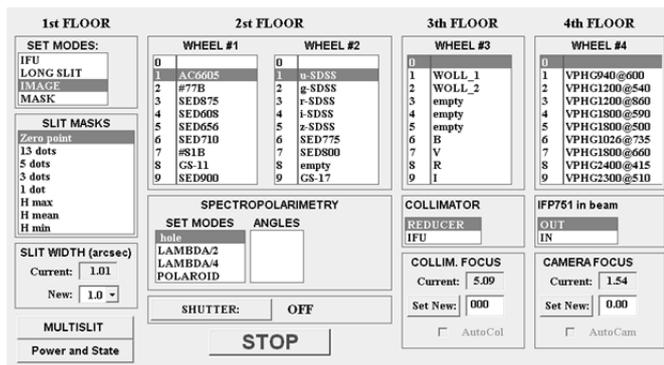


Рис. 6. Окно управления отдельными узлами SCORPIO-2

гида. В главном окне программы предусмотрено множество различных сервисных функций, например, кнопка «PA rotation», открывающая меню управления поворотным столом первичного фокуса телескопа, или «LEDs menu», где можно настроить интенсивность каждого из 32-х калибровочных светодиодов.

Управление отдельными узлами SCORPIO-2 осуществляется из окна, представленного на рис. 6. Для простоты отождествления, элементы в этом окне разбиты на группы по этажам, которые соответствуют реальному расположению узлов внутри прибора. Нажатием на различные пункты меню, большинство из которых пояснения не требуют, выбирается нужная конфигурация элементов. Кнопка «Stop» посылает команду на остановку всех моторов прибора. Флажок «AutoCol» (3-й этаж, коллиматор) подразумевает, что фокус коллиматора будет автоматически подстраиваться, в зависимости от того, какие оптические эле-

менты присутствуют в пучке. Фокус камеры редуктора также автоматически изменяется при смене коллиматоров (работа с IFU и во всех других режимах). Углы разворота анализаторов поляризации (блок «Spectropolarimetry») показаны только те, которые используются для работы с введенным анализатором. Соответственно, если каретка стоит в положении «hole» — углы не отображаются. Посмотреть текущие значения углов разворота всех анализаторов можно в меню «Power and State», где также отображаются напряжения и токи источников питания прибора, температура в нескольких критических точках и скорости моторов.

Организация удалённых наблюдений

Комплекс SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС управляется, как уже было сказано, через компактный компьютер, установленный в корпусе модуля управления фокального редуктора. Для дистанционной работы с этим компьютером используется программа управления удалённым рабочим столом Netop. Архитектура системы в упрощённом виде показана на рис. 7. Вся навесная аппаратура в кабине первичного фокуса БТА (SCORPIO-2, адаптер, контроллер ИФП, ПЗС-система) включена в сеть электропитания через дистанционно управляемую розетку AP7920 фирмы APC, доступ к интерфейсу которой осуществляется по локальной сети. Каждый из приборов, входящих в комплекс, может быть включен и выключен при помощи управляемой розетки независимо от других. Такая конфигурация более выгодна и надёжна чем управление общим питанием, либо автозапуск системы без управления питанием вовсе. В первом случае будет потеря времени на перезагрузку и выход на режим всего комплекса, во втором — при неблагоприятном стечении обстоятельств систему вообще не удастся удалённо перезагрузить.

Для выполнения наблюдений разработано программное обеспечение, которое объединяет пакет программ управления SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС, систему регистрации и архивации и систему управления телескопом в единый наблюдательный комплекс и само является элементом этого комплекса. Программный продукт включает:

- пакет программ управления комплексом SCORPIO-2 + адаптер + ПЗС + ИФП;
- пакет программ «Identstar» для поиска опорных звёзд;
- программы захвата опорных звёзд и автоматического гидирования;
- ПЗС-сервер;
- сервер управления телескопом;
- архив наблюдательных данных.

Программы установлены в операционной системе встроенного компьютера редуктора и связь с ними поддерживается по сети ethernet, при этом



Рис. 7. Блок-схема организации удалённых наблюдений со SCORPIO-2

пользователь работает только с IDL-оболочкой пакета программ управления комплексом и программой гидирования, также написанной под IDL. Первая по мере необходимости обращается как к редуктору, адаптеру и контроллеру ИФП, так и (через вызов соответствующих внешних программ) к ПЗС-контроллеру и телескопу.

Программа автоматического гидирования необходима, так как сопровождение телескопом объекта наблюдений не идеально, меняется рефракция и т. п. Прежде всего, с помощью программного пакета «Identstar», описанного в [10], в поле зрения телескопа выбираются яркие опорные звезды из каталога USNO 2.0 и определяются их координаты относительно оптической оси. Координаты передаются схеме управления адаптера, которая выводит микроскопы гида в заданную позицию. Далее — захват изображения опорной звезды на ПЗС-гида, непрерывное определение её координат и передача коррекции серверу телескопа. Оцифровка изображения от гидирующей ПЗС с кадровой частотой 25 Гц производится при помощи программы работы с телевизионным тюнером типа AverMedia, написанной на языке C++ Е. А. Ивановым (филиал «СОН «Архыз» АО «НПК «СПП» [17]). Подробное описание системы внеосевого гидирования можно найти в работе, посвящённой адаптеру [10].

Для организации взаимодействия программ управления наблюдательного комплекса, специальная директория сервера телескопа подключается в качестве сетевого диска компактного компьютера редуктора. Через эту директорию ведётся обмен командами и информацией между телескопом и редуктором. Непосредственное управление телескопом и контроль погоды осуществляются при помощи стандартного программного обеспечения, разработанного В. С. Шергиным (CAO РАН), на отдельном компьютере в комнате удалённых наблюдений.

Стоит упомянуть систему архивирования наблюдательных данных ASPID (Archive of Spectral, Photometric and Interferometric Data) [18], раз-

работанную для работы с данными, получаемыми на БТА методами низкого и умеренного спектрального разрешения, в частности, на приборах SCORPIO (SCORPIO-1, после модернизации в 2019 г.) и SCORPIO-2. В течение ночи наблюдений получаемые изображения записываются в стандартном FITS-формате (Flexible Image Transport System) в управляющий компьютер прибора. По окончании наблюдений в рабочей директории формируется журнал наблюдений и данные автоматически архивируются и копируются в рабочий архив на удалённом сервере, а также в общий архив CAO РАН. Далее, в течение месяца, формируется постоянный архив, данные которого доступны для параметрического поиска и чтения через веб-интерфейс.

Заключение

На приборах SCORPIO-1 и SCORPIO-2 выполняются различные наблюдательные программы, занимающие в общей сложности более 50 % наблюдательного времени БТА. По результатам, полученным на SCORPIO-2, опубликовано более ста работ.

Создана распределённая система управления экспериментом, позволяющая из единой точки управлять самыми разными инструментами: многорежимным редуктором светосилы, системой калибровки и внеосевого гидирования, системой регистрации изображений, системой архивации наблюдательных данных и телескопом.

Система управления редуктора позволяет собрать в одном блоке все элементы прибора, сократить до минимума количество внутренних и внешних связей. Возможность быстрого переключения между различными режимами обеспечивает гибкость в выборе наблюдательных программ под текущее состояние атмосферы, тем самым экономится наблюдательное время.

Работа поддержана грантом РФФИ 20-12-00030 «Исследование геометрии и кинематики ионизированного газа в ядрах активных галактик методами поляриметрии». Авторы благодарят В. Л. Афанасьева за грамотное руководство и личное участие во всех работах по проекту.

Литература

1. Gonzalez M., Ventura H., San Juan J., Di Fabrizio L. ARDOLORES: an Arduino based motors control system for DOLORES // Proc. SPIE: Ground-based and airborne instrumentation for astronomy. SPIE Conference Series, 2014. Vol. 9147. 6 pp.
2. Snodgrass C., Saviane I., Monaco L., Sinclair P. EFOSC2 Episode IV: A New Hope // The Messenger. 2008. Vol. 132. P. 18–19.
3. Rupprecht G., Bönhardt H., Moehler S., et al. Twenty years of FORS science operations on the VLT // The Messenger. 2010. Vol. 140. P. 2–7.

4. *Afanasev V. L., Gazhur E. B., Zhelenkov S. R., Moiseev A. V.* SCORPIO: prime focus reducer of the BTA // *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory*. 2005. Vol. 58. P. 90–117.
5. *Afanasev V. L., Moiseev A. V.* The SCORPIO universal focal reducer of the 6-m telescope // *Astronomy Letters*. 2005. Vol. 31, no. 3. P. 194–204.
6. *Afanasev V. L., Moiseev A. V.* Scorpio on the 6 m Telescope: current state and perspectives for spectroscopy of galactic and extragalactic objects // *Baltic Astronomy*. 2011. Vol. 20. P. 363–370.
7. *Afanasev V. L., Egorov O. V., Perepelitsyn A. E.* IFU unit in SCORPIO-2 focal reducer for integral-field spectroscopy on the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences // *Astrophysical Bulletin*. 2018. Vol. 73, no. 3. P. 373–386.
8. ООО «Опто-Технологическая Лаборатория» [Электронный ресурс]. URL: <https://optotl.ru> (дата обращения: 30.06.2020).
9. CAO РАН: страница проекта SCORPIO-2 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2> (дата обращения: 30.06.2020).
10. *Afanasev V. L., Amirkhanyan V. R., Moiseev A. V., et al.* SCORPIO-2 Guiding and calibration system in the prime focus of the 6-m telescope // *Astrophysical Bulletin*. 2017. Vol. 72. P. 458–468.
11. *Moiseev A. V.* Reduction of CCD observations with scanning Fabry-Perot interferometer // *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory*. 2002. Vol. 54. P. 74–88.
12. *Moiseev A. V., Egorov O. V.* Reduction of CCD observations made with the Fabry-Perot scanning interferometer. II. Additional procedures // *Astrophysical Bulletin*. 2008. Vol. 63. P. 181–192.
13. *Moiseev A. V.* Reduction of CCD observations made with a scanning Fabry-Perot interferometer. III. Wavelength scale refinement // *Astrophysical Bulletin*. 2015. Vol. 70. P. 494–500.
14. *Мурзин В. А., Маркелов С. В., Ардиланов В. И. и др.* Астрономические ПЗС-системы для 6-метрового телескопа БТА (обзор) // *Успехи прикладной физики*. 2016. Т. 4, № 5. С. 500–506.
15. Поляризационные и интерферометрические измерения протяженных астрономических объектов на оптическом телескопе БТА: отчет о НИР (итоговый, этап № 3) / CAO РАН, № 01201273569. Рук. Афанасьев В. Л. Н. Архыз, 2012. С. 81–97.
16. *Afanasev V. L., Amirkhanyan V. R.* Technique of polarimetric observations of faint objects at the 6-m BTA telescope // *Astrophysical Bulletin*. 2012. Vol. 67, no. 4. P. 438–452.
17. Филиал «СОН «Архыз» АО «НПК «СПП» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.npk-spp.ru/about/branches-of-the-corporation/103-arxiz.html> (дата обращения: 30.06.2020).
18. *Chilingarian I., Afanasiev V., Bonnarel F., et al.* ASPID-SR: Prototype of a VO-Compliant, Science-ready data archive // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI* / ed. by Shaw R., Hill F., Bell D. Astronomical society of the pacific conference series, 2007. Vol. 376. P. 217.