

УДК 520.627, 520.85

СТОКС-ПОЛЯРИМЕТР ДЛЯ 1-МЕТРОВОГО ТЕЛЕСКОПА

© 2021 **В. Л. Афанасьев**^{1*}, **Е. С. Шабловинская**^{1**}, **Р. И. Уклеин**¹, **Е. А. Малыгин**¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 2 октября 2020 года; после доработки 23 ноября 2020 года; принята к публикации 23 ноября 2020 года

Описывается фотометр-поляриметр «СтоП» (Стокс-поляриметр), который применяется для наблюдений на 1-м телескопе САО РАН с начала 2020 года. В работе представлено описание прибора и его параметры при наблюдениях в фотометрическом и поляриметрическом режимах. Возможности прибора демонстрируются на примере поляриметрии блазара S5 0716+714 и сравниваются с результатами, ранее полученными на БТА.

Ключевые слова: *инструменты: поляриметры — техника: поляриметрия*

1. ВВЕДЕНИЕ

Эхокартирование (или реверберация) в настоящее время является единственным методом в оптическом диапазоне спектра, позволяющим изучать геометрию и кинематику центральных областей активных ядер галактик (АЯГ), таких как сейфертовские галактики, квазары и лацертиды. Для спектральных наблюдений в этом случае требуется использование телескопов диаметром 2–3 метра, а длительный мониторинг — широкой кооперации. На телескопах 1-метрового класса спектральные методы применимы только для самых ярких АЯГ, которые уже хорошо изучены. Массовый мониторинг излучения области формирования широких линий (broad line region, BLR) на малых телескопах возможен только с использованием фильтров, выделяющих необходимые участки спектра. Впервые это было сделано в работе Cherepashchuk and Lyutyi (1973). Автоматический мониторинг АЯГ с использованием набора узкополосных интерференционных фильтров получает сейчас большое распространение и проводится, например, на 43 см телескопе обсерватории Wise (Pozo Nuñez et al. 2017).

Фотометрические наблюдения в среднеполосных интерференционных фильтрах по программе эхокартирования BLR были начаты в САО на телескопе Цейсс-1000 (Komarov et al.) в январе 2018 года на приборе MaNGaL (Moiseev et al. 2020), а затем продолжены на разработанном в обсерватории приборе ММРР (Multi-Mode Photometer-Polarimeter) (Emelianov and Fatkhullin 2019, Komarov et al.). Мы использовали фильтры из

имеющегося у нас набора среднеполосных фильтров, предназначенного для исследования распределения энергии активных галактик¹. Методика реверберационных наблюдений в среднеполосных фильтрах и первые результаты приведены в работе Uklein et al. (2019). В последние годы стало ясно, что важную информацию о структуре центральных областей АЯГ может дать эхокартирование BLR в поляризованном свете (Shablovinskaya et al. 2020) и мониторинг блеска и поляризации лацертид с высокой точностью² (Shablovinskaya and Afanasiev 2019). Поэтому, наряду со спектрополяриметрическими наблюдениями АЯГ, которые позволяют независимо определять массы сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в центрах галактик (Afanasiev and Popović 2015), крайне важно проводить мониторинг изменения поляризованного потока в широких линиях у объектов с экваториальным рассеянием на газовой-пылевой торе.

В 2019 году мы начали программы поляриметрических наблюдений на телескопе Цейсс-1000, используя ММРР — единственный на тот момент прибор с режимом поляриметрии. Из-за использования дихроичного поляроида в качестве анализатора поляризации точность поляриметрии оказалась на порядок хуже требуемой для решения поставленных задач (см. раздел 3). Это связано, в первую очередь, с одновременным измерением поляризованного излучения объекта в разных углах поворота поляроида. Для измерения линейной поляризации с точностью 0.1–0.2% необходимо

¹https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/filters_eng.html

²Здесь и далее под термином «поляризация» будет пониматься линейная поляризация излучения.

*E-mail: vafan@sao.ru

**E-mail: e.shablie@yandex.com

использовать приборы, одновременно измеряющие три параметра Стокса. Такой прибор, в качестве пилотного проекта, был разработан нами в 2012 году, однако по ряду причин работа была приостановлена. Изначально прибор был предназначен для мониторинга переменности поляризации звездобразных объектов — лацертид и катаклизмических переменных звезд в широких фотометрических полосах с использованием нового для того времени светоприемника Andor Neo sCMOS (Ay et al. 2002). Такой светоприемник должен обеспечивать быструю регистрацию изображений, что необходимо для подавления атмосферного мерцания потока в поляризованном свете. В 2019 г. мы продолжили работу над этим прибором, и он был существенно модернизирован (изменена система управления и использован более эффективный светоприемник).

В данной статье описаны оптико-механическая схема нового прибора «СтоП» (Стокс-поляриметр) для телескопа Цейсс-1000 и его основные характеристики. Рассматриваются особенности наблюдений в режимах фотометрии и поляриметрии и приводятся результаты поляриметрических наблюдений на 1-м телескопе и калибровки прибора.

2. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Прибор предназначен для работы в двух режимах: поляриметрии и фотометрии. Оптическая схема в режиме поляриметрии выполнена по схеме Черни–Тернера (рис. 1), в которой входная фокальная плоскость S перестраивается в плоскость светоприемника S' при помощи двух внеосевых параболических зеркал $M1$ и $M3$ с фокусным расстоянием 300 мм. В выходной зрачок прибора (изображение зеркала телескопа) установлен анализатор поляризации A . Для входной светосилы пучка $F/12.5$ размер зрачка равен 24 мм. Для уменьшения размеров прибора световой пучок после анализатора ломается при помощи плоского зеркала $M2$. В качестве анализатора поляризации мы используем двойную призму Волластона (Oliva 1997). Такой анализатор состоит из двух призм Волластона размером $30 \times 15 \times 5$ мм, которые делят зрачок на две равные половины, где каждая из призм разводит обыкновенный и необыкновенный лучи на $0^\circ 75'$. Для устранения наложения изображений, формирующихся каждой призмой, после них установлены ахроматические клинья, разводящие лучи от каждой призмы на $1^\circ 5'$. Первая призма изготовлена таким образом, что обыкновенный и необыкновенный лучи соответствуют направлениям колебаний электрического вектора 0° и 90° , а у второй призмы эти направления соответствуют 45° и 135° . Входное поле ограничивается прямоугольной диафрагмой 3.5×24 мм, установленной в плоскости S . В результате, как показано на рис. 1,

мы получаем в плоскости светоприемника четыре изображения входной диафрагмы, смещенные по высоте на 4 мм и соответствующие направлениям колебаний электрического вектора 0° , 90° , 45° и 135° . Угловой размер поля зрения, ограниченного маской, для 1-м телескопа соответствует 0.9×6.1 минуты дуги на небесной сфере.

Работа в режиме фотометра обеспечивается вводом в пучок диагонального зеркала $M4$. Перед выходной фокальной плоскостью установлены две турели светофильтров $F1$ и $F2$, каждая на девять позиций. Диаметр оправ фильтров, устанавливаемых в турелях, равен 50 мм, а допустимая толщина не более 7 мм. В качестве светофильтров мы используем изготовленные нами из отечественных цветных стёкол широкополосные фильтры и среднеполосные интерференционные фильтры.

Оптическая схема прибора была рассчитана для работы со светоприемником Andor Neo sCMOS, который имеет размер 13×18 мм при размере пикселя 6×6 мкм. При этом длинная сторона формата светоприемника должна располагаться вдоль направления разведения пучков анализатора поляризации. Однако, в силу разного рода причин — в основном из-за фотометрических свойств на длинных экспозициях и невысокой квантовой эффективности, мы отказались от использования этого светоприемника и перешли на более подходящую для наших задач малокадровую ПЗС-матрицу. В приборе в качестве светоприемника нами установлена ПЗС-матрица Andor iKon-L 936 формата 2048×2048 с размером пикселя 13.5×13.5 мкм, что соответствует масштабу изображения $0'' 21/\text{пиксель}$ для работы на 1-м телескопе. Однако из-за особенностей оптической схемы вдоль длинной стороны входной диафрагмы наблюдается заметное геометрическое виньетирование. Размер невиньетированного поля зрения в этом направлении составляет 19.5 мм. Таким образом, размер невиньетированного поля зрения в режиме поляриметрии составляет 0.9×5 минут дуги, в режиме фотометрии — 5×7 минут дуги. Используемая нами матрица имеет квантовую эффективность более 90% в диапазоне 400–850 мкм и малый шум считывания. Рабочая температура ПЗС составляет -85°C , что обеспечивает темновые шумы ниже шума считывания при экспозициях 5–10 минут. Общий вес прибора с поворотным кругом составляет 54 кг.

Пропускание оптической системы прибора определяется коэффициентом отражения зеркал, покрытых защищенным серебром, который составляет более 98% в видимом диапазоне, а также френелевскими потерями на поверхностях призм Волластона примерно 7%. Таким образом, пропускание системы оценивается приблизительно в

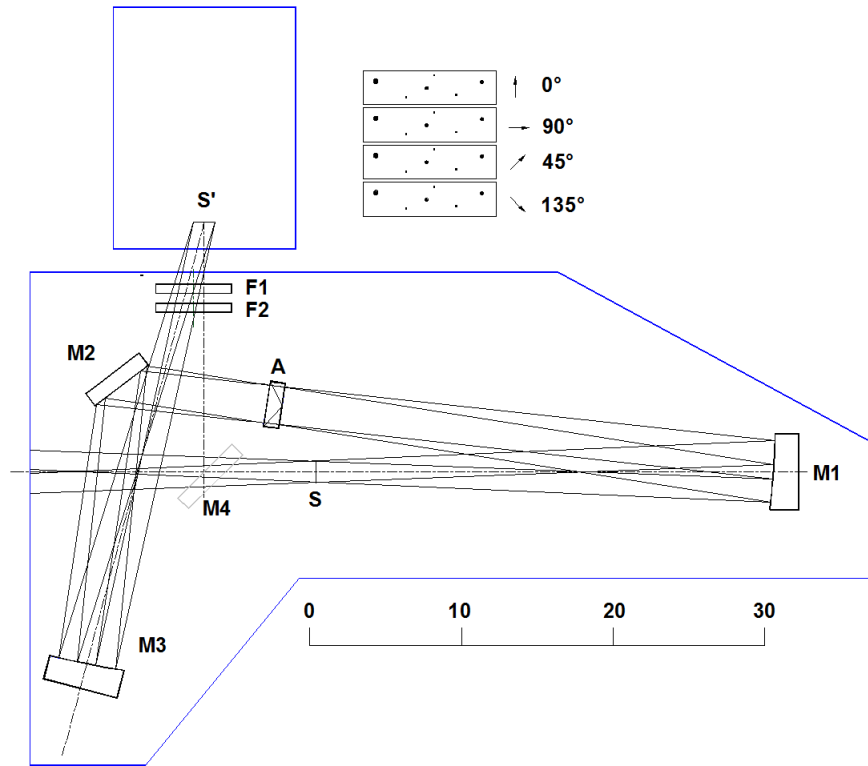


Рис. 1. Оптическая схема Стокс-поляриметра: M1, M3 — внеосевые параболические зеркала; M2, M4 — диагональные плоские зеркала; A — анализатор поляризации; F1 и F2 — турели со сменными светофильтрами. Синей сплошной линией показаны габариты прибора и светоприемника. Шкала в нижней части рисунка дана в сантиметрах.

86% в режиме поляриметрии (без учёта квантовой эффективности матрицы, кривых пропускания фильтров и коэффициентов отражения зеркал телескопа).

Управление всеми механическими узлами (переключение фильтров, ввод/вывод диагональных зеркал, поворот прибора по позиционному углу) осуществляется при помощи разработанной нами управляющей платы с микропроцессором. В приборе установлен микрокомпьютер, который посылает управляющие команды на прибор и на контроллер ПЗС. Управление Стокс-поляриметром во время наблюдений осуществляется дистанционно по сети Ethernet при помощи программного интерфейса, написанного в среде IDL.

3. РЕЖИМЫ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Фотометрия

Как отмечалось в предыдущем разделе, в приборе «СтоП» устанавливается до 16 светофильтров, которые могут использоваться для фотометрических наблюдений. Среднеполосные фильтры с шириной полосы пропускания 250 \AA используются для получения изображений и оценки потоков объектов в широких эмиссионных линиях (в основном,

смещённых $H\alpha$ и $H\beta$) и континууме рядом с ними. С помощью среднеполосных фильтров реализуется программа фотометрического эхокартирования АЯГ вплоть до красных смещений $z \sim 0.8$, а также эхокартирование близких сейфертовских галактик в поляризованном свете.

Набор стеклянных широкополосных светофильтров позволяет реализовать фотометрическую систему $UBVR_cI_c$ Джонсона–Казинца (Bessell 1990). Для определения коэффициентов преобразования инструментальных величин прибора в стандартную фотометрическую систему 15 января 2020 года была проведена фотометрия звёзд рассеянного скопления NGC 2420. Инструментальные звёздные величины b, v, r, i рассчитаны как $-2.5 \lg(N)$, где N — количество отсчётов (ADU) в секунду фотометрируемого объекта в соответствующей полосе, полученное в режиме усиления $1.44e^-/\text{ADU}$. Для выноса звёздных величин за атмосферу в ту же ночь были получены коэффициенты экстинкции по наблюдениям звезды — спектрофотометрического стандарта Feige 34. Коэффициенты экстинкции составили:

$$\alpha_B = 0^m29 \pm 0^m01,$$

$$\alpha_V = 0^m19 \pm 0^m01,$$

$$\alpha_{R_c} = 0^{\text{m}}16 \pm 0^{\text{m}}01,$$

$$\alpha_{I_c} = 0^{\text{m}}09 \pm 0^{\text{m}}01.$$

Было выбрано 16 звёзд скопления, измеренные величины которых (*bvri*) сравнивались с литературными (*BVRI*). Уравнения преобразования имеют вид:

$$B = b + 0.08^{\pm 0.03}(B - V) + 22.58^{\pm 0.02},$$

$$V = v - 0.07^{\pm 0.03}(B - V) + 22.85^{\pm 0.02},$$

$$R = r + 0.11^{\pm 0.07}(V - R) + 22.88^{\pm 0.03},$$

$$I = i - 0.04^{\pm 0.06}(V - I) + 22.40^{\pm 0.05}.$$

3.2. Поляриметрия

В приборе «СтоП» двойная призма Волластона используется как анализатор поляризации. Несмотря на то, что призма была предложена для астрономических исследований ещё в работах 90-х годов (Geyer et al. 1993, Oliva 1997), в настоящий момент она используется редко, в первую очередь, из-за сложности изготовления кристалла. Преимуществом двойной призмы Волластона является то, что одновременно регистрируются четыре направления поляризации: 0° , 90° , 45° , 135° , и следовательно, три параметра Стокса I, Q, U , описывающие интенсивность и линейную поляризацию, измеряются одновременно. Поляризационная модель прибора в виде матрицы Мюллера для аналогичного кристалла представлена в статье Afanasiev and Amirkhanyan (2012), формула (3). С точностью до преобразования поворота нормированные параметры Стокса Q и U вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{I} &= \frac{I_0 - I_{90} D_Q}{I_0 + I_{90} D_Q}, \\ \frac{U}{I} &= \frac{I_{45} - I_{135} D_U}{I_{45} + I_{135} D_U}, \end{aligned} \quad (1)$$

где D_Q и D_U — коэффициенты пропускания поляризационных каналов. Эти коэффициенты учитывают как инструментальную поляризацию в приборе, так и атмосферную деполяризацию (см. подробнее Afanasiev and Amirkhanyan 2012). Тогда степень P и угол плоскости поляризации φ :

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{Q^2 + U^2}, \\ \varphi' &= \frac{1}{2} \arctg Q/U, \end{aligned}$$

где φ' — значение инструментального угла плоскости поляризации. Для преобразования в истинную величину используется формула:

$$\varphi = \varphi' + PA + 89^\circ 1,$$

где PA — позиционный угол прибора.

Одновременная регистрация потоков в четырех направлениях поляризации позволяет контролировать быстро изменяющиеся параметры деполяризации в атмосфере и, следовательно, повышать точность поляриметрии по сравнению с использованием других анализаторов. Единственный большой недостаток двойной призмы Волластона — это необходимость использования прямоугольной маски, из-за чего поле зрения уменьшается в разы. Из-за этого призма применяется при спектрополяриметрических наблюдениях, а также для поляриметрии звездообразных объектов, как это делается на БТА с прибором SCORPIO-2.

Ещё одной особенностью работы в поляриметрическом режиме является наличие собственной дисперсии призмы Волластона. Хроматические aberrации, вносимые призмой, искажают изображения в направлении поперёк маски и имеют масштаб менее $1''5$, что сравнимо с качеством изображений в САО. В случае наблюдений близко расположенных объектов прибор может быть ориентирован с помощью поворотного стола так, чтобы уширенные хроматическими aberrациями изображения объектов не накладывались друг на друга.

Поскольку в оптической системе прибора используются наклонные зеркала, имеет место инструментальная поляризация. Для измерения уровня инструментальной поляризации в течение нескольких весенних наблюдательных сетов при фотометрической погоде проводилась съёмка звёзд — стандартов нулевой поляризации. Нуль-пункт инструментальной поляризации составил 0.74% при вариациях по полю менее 0.1%. Направление инструментальной поляризации совпадает с направлением маски с точностью $\pm 3^\circ$. Рассеянный свет не вносит значимого вклада в значение инструментальной поляризации.

На рис. 2 приводится сравнение результатов наших наблюдений поляризованных стандартов с опубликованными литературными данными. Ошибка измерения степени поляризации составила $(P_{\text{tab}} - P_{\text{obs}}) \sim 0.15\%$ и угла поляризации $(\varphi_{\text{tab}} - \varphi_{\text{obs}}) \sim 0^\circ 7$.

Для сравнения на рис. 3 приводятся аналогичные зависимости наблюдаемых значений степени и угла поляризации от литературных для прибора ММРР (Emelianov and Fatkhullin 2019), используемого на телескопе Цейсс-1000 с 2018 г. и находящегося в режиме тестовой эксплуатации на момент написания статьи. В качестве анализатора поляризации используется дихроичный поляризатор, устанавливаемый в три положения -60° , 0° , 60° и дающий поле зрения примерно $6' \times 6'$. Из-за неодновременной съёмки объекта в разных направлениях поляризации и медленного вращения

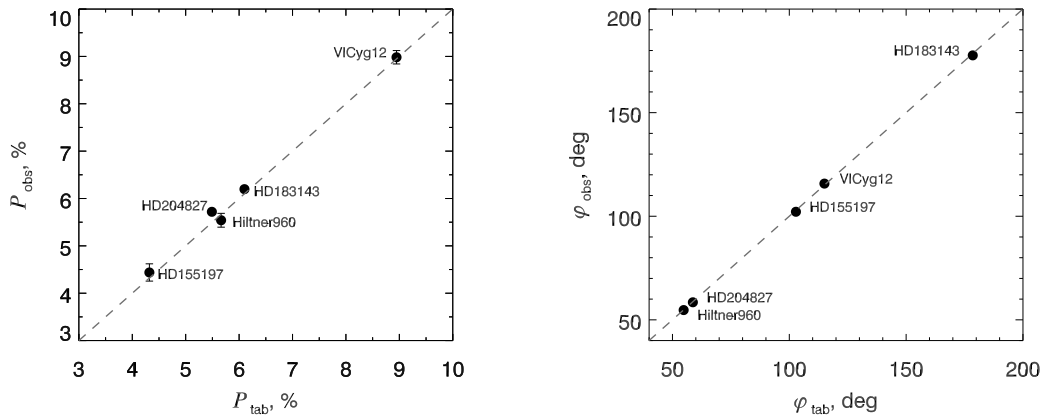


Рис. 2. Отклонение измеренных значений степени поляризации (слева) и угла плоскости поляризации (справа) от литературных значений для прибора «СтоП».

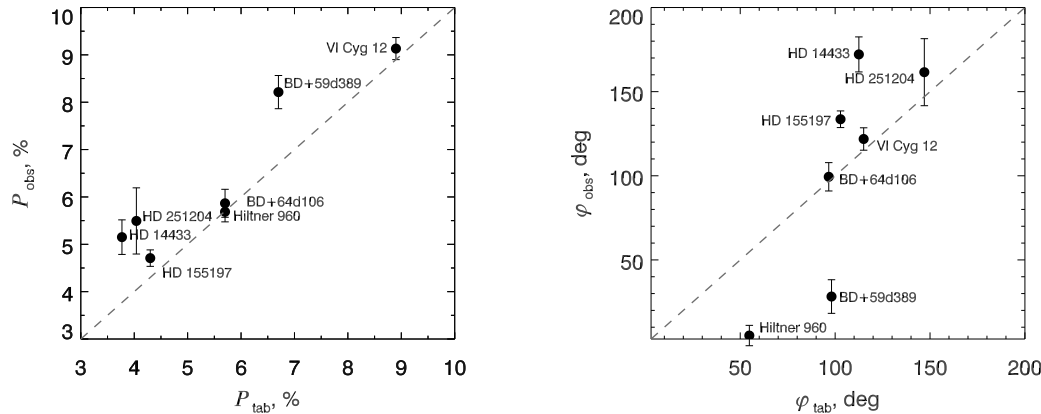


Рис. 3. Отклонение измеренных значений степени поляризации (слева) и угла плоскости поляризации (справа) от литературных значений для прибора MMPP.

поляроида (до 20 с между положениями) при такой методике измерения поляризации наблюдения становятся особенно чувствительными к погоде, а точность заметно снижается. На графиках видно, что ошибка измерения степени поляризации составляет $(P_{\text{tab}} - P_{\text{obs}}) \sim 1.1\%$ и угла поляризации $(\varphi_{\text{tab}} - \varphi_{\text{obs}}) \sim 45^\circ$. Такая точность недостаточна для реализации задач исследования внегалактических объектов.

4. НАБЛЮДЕНИЯ

Основной задачей прибора «СтоП» являются высокоточные поляриметрические наблюдения звездообразных объектов, для чего нет аналогов среди навесного оборудования телескопа Цейсс-1000. Методика измерения поляризации точечных объектов с точностью 0.1% была успешно применена на БТА с прибором SCORPIO-2 (Shablovinskaya and Afanasiev 2019), где в наблюдениях использовался анализатор, аналогичный

установленному в «СтоП» — двойная призма Волластона WOLL-2. Для проверки работы методики наблюдений было решено повторить наблюдения блазара S5 0716+714.

16 января 2020 г. на телескопе Цейсс-1000 с прибором «СтоП» был проведён 8.5-часовой мониторинг блазара S5 0716+714 в поляризованном свете. Было получено 440 60-секундных экспозиций, разделённых временем считывания не более 10 с. Наблюдения проводились в белом свете. Маска была сориентирована так, что в поле зрения попадали две звезды-стандарта (Amirkhanyan 2006), находящиеся около объекта. Звёзды-стандарты имеют постоянный блеск и нулевую поляризацию, поэтому использовались для дифференциальной поляриметрии объекта. Нормированные параметры Стокса были рассчитаны по формулам (1) относительно опорных звёзд в поле.

Результаты наблюдений представлены на рис. 4. Ошибка фотометрии не превышает $0^{\text{m}}005$, средняя

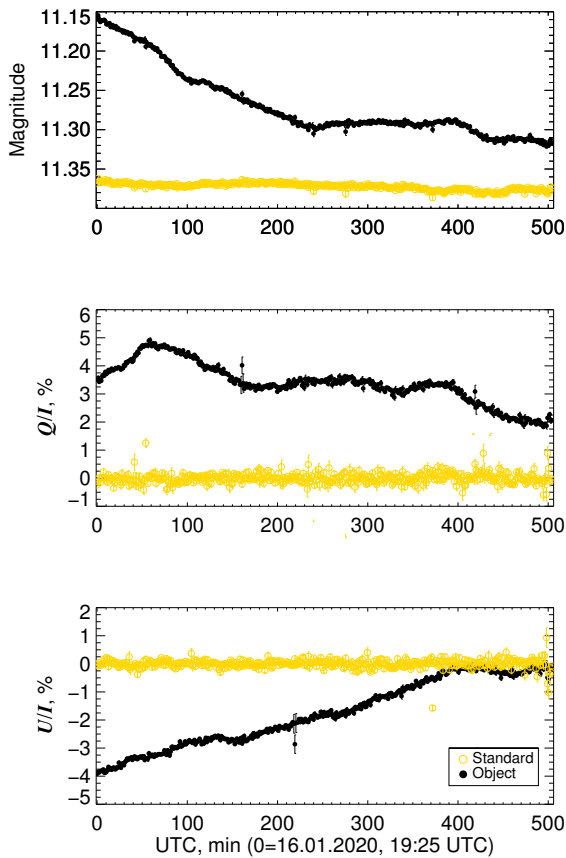


Рис. 4. Изменения звёздной величины и нормированных параметров Стокса Q и U в течение ночи.

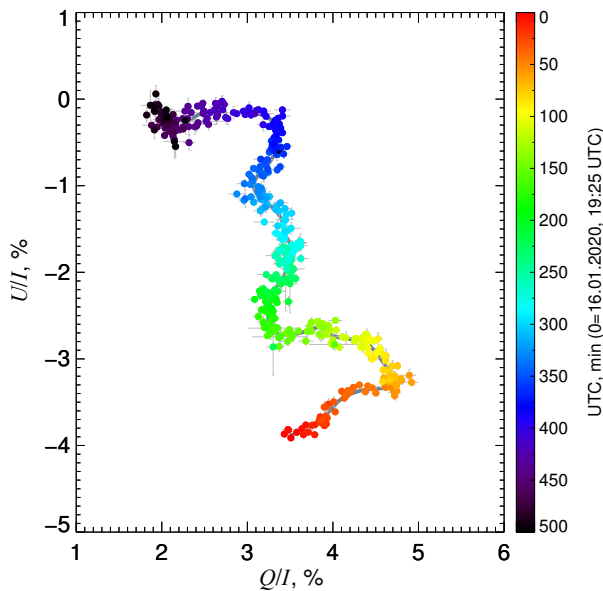


Рис. 5. Изменения нормированных параметров Стокса Q и U в течение ночи в проекции на QU -плоскость.

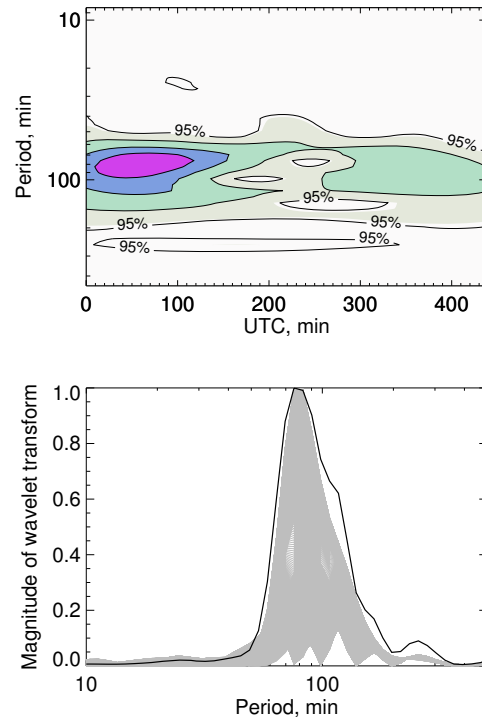


Рис. 6. Результат вейвлет-анализа кривой блеска блазара S5 0716+714. Максимум профиля вейвлет-преобразования соответствует периоду изменения блеска порядка 76 минут.

ошибка измерения поляризации 0.05%. На рис. 5 наблюдения представлены на QU -диаграмме, где цветом указано время от начала наблюдения объекта. На рисунке видно, что в течение ночи меняется вектор поляризации, причём его изменения происходят плавно с переключением направления с периодом приблизительно 75 минут. Такой же период обнаруживается и на кривой блеска, исправленной за долгопериодичный тренд, аппроксимируемый с помощью алгоритма локально-линейной регрессии LOESS. На рис. 6 представлен результат вейвлет-анализа быстрых изменений блеска объекта. Вейвлет-преобразование показывает период вариаций блеска объекта 76 ± 10 минут. Соответствие периодов вариаций блеска и изменения направления вектора поляризации, а также величина периода полностью соответствуют результату, полученному ранее авторами этой статьи на телескопе БТА (Shablovinskaya and Afanasiev 2019). Таким образом, приведённый пример наблюдений показывает, что задача поляриметрии звездообразных относительно ярких (примерно $13-14^m$) объектов может быть успешно реализована на 1-м телескопе с прибором «СтоП», при этом точность фотометрии и поляриметрии не уступают получаемым на 6-м телескопе.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прибор «СтоП» был введен в эксплуатацию в начале 2020 года. Было показано, что прибор позволяет достигать точностей, необходимых для исследования внегалактических объектов фотометрическими и поляриметрическими методами. В течение первого полугодия эксплуатации прибора были получены значимые научные результаты, как те, что представлены в данной работе, так и отправленные в другие научные журналы (Malygin et al. 2020). Таким образом, прибор повышает эффективность наблюдений и расширяет спектр наблюдательных задач, доступных для реализации на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В. В. Комарова и инженеров лаборатории обеспечения наблюдений (ЛОН) САО РАН за техническую помощь в проведении наблюдений на телескопе Цейсс-1000, В. Р. Амирханяна за настройку электроники прибора, а также Э. В. Емельянова и сотрудников ЛОН за доступ к работе на фотометре-поляриметре ММРР.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №20-12-00030 «Исследование геометрии и кинематики ионизированного газа в ядрах активных галактик методами поляриметрии». Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение № 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Stokes-Polarimeter for 1-m Telescope

V. L. Afanasiev¹, E. S. Shablovinskaya¹, R. I. Uklein¹, and E. A. Malygin¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

We present the “StoP” photometer-polarimeter (Stokes-polarimeter) used for observations with the 1-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences since the beginning of 2020. We describe the instrument and its parameters in observations performed in the photometric and polarimetric modes. We demonstrate the capabilities of the instrument through the polarimetry of the blazar S5 0716+714 and compare the results with those earlier obtained with the 6-m telescope.

Keywords: *instrumentation: polarimeters—techniques: polarimetric*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **67** (4), 438 (2012).
2. V. L. Afanasiev and L. Č. Popović, *Astrophys. J.* **800** (2), L35 (2015).
3. V. R. Amirkhanyan, *Astronomy Reports* **50** (4), 273 (2006).
4. S. U. Ay, M. P. Lesser, and E. R. Fossum, *SPIE Conf. Proc.* **4836**, 271 (2002).
5. M. S. Bessell, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **102**, 1181 (1990).
6. A. M. Cherepashchuk and V. M. Lyutyi, *Astronomy Letters* **13**, 165 (1973).
7. E. V. Emelianov and T. A. Fatkhullin, in *Труды IX Всероссийской научной конференции по системному синтезу и прикладной синергетике, Нижний Архыз, Россия, 24-27 сентября 2019* (Изд. Южного федерального унив., Ростов-на-Дону, Таганрог, 2019), сс. 223–228.
8. E. H. Geyer, N. N. Kiselev, G. P. Chernova, and K. Jockers, *IAU Symp. Abstracts* **160**, 116 (1993).
9. V. V. Komarov, A. S. Moskvitin, V. D. Bychkov, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 486 (2020).
10. E. A. Malygin, E. S. Shablovinskaya, R. I. Uklein, and A. A. Grokhovskaya, *Astronomy Letters*, 2020 (in press).
11. A. Moiseev, A. Perepelitsyn, and D. Oparin, *Experimental Astronomy* **50** (2–3), 199 (2020).
12. E. Oliva, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **123**, 589 (1997).
13. F. Pozo Nuñez, D. Chelouche, S. Kaspi, and S. Niv, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **129** (9), 094101 (2017).
14. E. S. Shablovinskaya and V. L. Afanasiev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (4), 4322 (2019).
15. E. S. Shablovinskaya, V. L. Afanasiev, and L. Č. Popović, *Astrophys. J.* **892** (2), 118 (2020).
16. R. I. Uklein, E. A. Malygin, E. S. Shablovinskaya, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 388 (2019).