

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
Государственного астрономического
института имени П.К. Штернберга
МГУ имени М.В. Ломоносова
по науке и перспективному развитию

А.А. Белинский

4 января 2022 г.

Председатель национального комитета по
тематике российских телескопов

проф. К.А. Постнов

14 января 2022 г.

Циркулярное письмо национального комитета по тематике российских телескопов

В декабре 2021 г. был принят в эксплуатацию новый 2,5-м телескоп Кавказской горной обсерватории (КГО) Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (ГАИШ МГУ). С характеристиками обсерватории, телескопа и его инструментов можно ознакомиться в статье Shatsky et al, Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proc. of the All-Russian Conference held 21-25 September, 2020 in Nizhny Arkhyz, Russia, 2020, p. 127-132 ([arXiv:2010.10850](https://arxiv.org/abs/2010.10850)) и по приводимым в ней ссылкам.

Для внешних заявителей во второй половине 2022 года предоставляется 20% наблюдательного времени (36 ночей).

К использованию на телескопе с 25 июля 2022 года (семестр 2022В и далее) объявляются описанные ниже приборы.

Транзиентный Двухлучевой Спектрограф (TDS)

Статус прибора – общего пользования

Ответственный – С.А. Потанин (potanin@sai.msu.ru)

Основные характеристики:

- Длина щели спектрографа 3 минуты дуги, ширина рабочей щели — 0.1 мм (0.97"), увеличенной — 0.15 мм (1.5"), спектрофотометрической — 1 мм (9.7").
- Спектр снимается одновременно в двух диапазонах двумя камерами — в канале **B** от 360 до 577 нм и в канале **R** от 567 до 746 нм с разрешающей силой 1300 и 2500, соответственно. В синем канале также доступен режим с удвоенной дисперсией (полоса **G** с диапазоном 430-543 мкм и разрешающей силой 2600).
- Спектрограф снабжен защелевым подсмотром (включается вводом зеркала при подготовке экспозиций) и калибровочным блоком для калибровки щели и «плоского поля» и калибровки по длине волны. Поле зрения подсмотра в диаметре 3 минуты дуги (с некоторыми внеосевыми искажениями), камера позволяет уверенно видеть объекты до 18-й величины и более слабые с накоплением до 10 секунд.

Подробное описание спектрографа приведено в статье Потанина и др. (2020).
Актуальная информация и новости прибора помещаются на сайте
<http://Infm1.sai.msu.ru/kgoinstruments/tds/> (см. также <http://arca.sai.msu.ru/filters?ics=TDS>).

Экспозиции:

Спектры выполняются в режиме LONG с экспозицией длиной от 0.2 сек до 20 минут (сверхкороткие выдержки используются для калибровок по дневному небу и специальных задач). Вопросы световой эффективности и вытекающие шумовые характеристики спектров рассмотрены в статье Потанина и др. (2020). Для приблизительных оценок там описаны следующие факторы:

1. реперные величины звезд типа A0V, дающие сигнал в 1 фотозлектрон экстрагированного спектра за 1 секунду экспозиции без учёта атмосферы: $\text{mag1 (B)} = 17.^m6$, $\text{mag1 (G)} = 16.^m8$, $\text{mag1 (R)} = 17.^m2$.
2. Для учета атмосферного поглощения нужно внести коррекцию за экстинкцию с ожидаемой воздушной массой объекта (определяемой обычно склонением для экваториальных или южных объектов) и средними коэффициентами экстинкции в каналах: $R \sim 0.^m15$, $G \sim 0.^m25$, $B \sim 0.^m3$.
3. При щелевых (не спектрофотометрических) наблюдениях надо учитывать потери на щели (30-60% в зависимости от качества изображений), а для совсем слабых ($>19^m$) объектов также появляются определенные потери от неточности центрирования плохо видимого объекта на щели и ухода его с щели при длинной экспозиции из-за дифференциальных гнуптий подвеса спектрографа и “руки” автогида.
4. Шум считывания на рабочей скорости оцифровки 3.1 электрона. Дисперсия темнового шума сравнивается с шумом считывания на экспозиции порядка 30 минут.
5. Предельной звездной величиной измеряемых объектов можно считать $V=20^m$.

Накладные расходы:

В расчёт бюджета потребного наблюдательного времени входят следующие компоненты (кроме чистого времени экспозиций):

1. Время наведения телескопа — от 10 до 60 с;
2. Фокусировка — 2.5 мин, раз в 30–120 минут в зависимости от условий;
3. Время считывания и записи накопленного полного кадра — 4 с;
4. Время на ввод-вывод подсмотра, смену дисперсора — 3 с;
5. Время ввода-вывода зеркала переброса света от калибровочного источника и перехода с/на режим прямых снимков с ПЗС-фотометром NBI — 20 с.

Автогидирование запускается само и накладных расходов практически не прибавляет.

Литература

1. Потанин С.А., Белинский А.А., Додин А.В. и др., Письма в Астрономический журнал , 46, 894, 2020

Инфракрасная (ИК) камера-спектрограф ASTRONIRCAM (ANC)

Статус прибора – общего пользования

Ответственный – А.М. Татарников (andrew@sai.msu.ru)

Сервисные наблюдения с ANC выполняются в двух режимах — прямые изображения в широкополосных и узкополосных фильтрах и спектры с длинной щелью в полосах *Y, J, H, K* ближнего ИК-диапазона или, для ярких объектов, — с кросс-дисперсией в полосах *YJ* или *HK*. Ниже описаны эти режимы. Более подробное описание прибора и указания по составлению таблиц программ наблюдений доступны по ссылке http://lnfm1.sai.msu.ru/kgoinstruments/app_form/instruct_proposal_ANC.pdf

1. Фотометрия (режим PHOT)

Основные характеристики:

Поле зрения ИК камеры — 4.64'×4.64' (формат кадра 1024×1024 пикселей), изображения получают зеркальными. Данные получают элементарными экспозициями в режиме Ramp (см. Наджип и др., 2017) длиной 30-100 секунд (для звёзд ярче 12^m - короче), обычно в режиме «дизеринга», чередующего от 5 до 30 кадров с такими накоплениями (для достижения нужной фотометрической точности) со сдвигами точки наведения телескопа от кадра к кадру на 3-10 секунд дуги. В итоге получается от 5 до 30 индивидуальных кадров, по которым возможно проведение фотометрии для ярких объектов (примерно до 16^m, в зависимости от seeing, фильтра и времени накопления) или формирование одного комбинированного кадра, по которому получают оценки блеска объектов в поле зрения.

Плата за «чистые» изображения, полученные методом «дизеринга» с суммированием отдельных кадров, — недодержка на краях поля, поэтому края кадра для звезд сравнения использовать не рекомендуется. Ориентировочно объект и звезды сравнения должны попадать на площадку размером около 3'-4' (зависит от необходимого для достижения заявленной точности количества отдельных кадров). Исходя из этого выбираются координаты центра поля зрения (координаты точки наведения телескопа) и, если это крайне необходимо, ориентация кадра. Произвольная ориентация кадра предпочтительней, так как прибор установлен в фокусе Несмита с доступным диапазоном ротации не более ±70 градусов относительно вертикали. Поэтому в момент наблюдений, с учётом их планируемой продолжительности и положения объекта на небе, определяющими диапазон деротации, оказывается доступным только ограниченный диапазон позиционных углов снимков.

Фильтры:

Доступны следующие фильтры: широкополосные *Y, J, H, K, Ks* системы MKO-NIR (не путать с 2MASS) и узкополосные [FeII], CO, BrG, H2_1, Kcont. Характеристики фильтров и кривые пропускания даны в <https://arca.sai.msu.ru/filters?ics=ANC>.

Экспозиции:

В режиме фотометрии PHOT (формат кадра 1К×1К) доступны экспозиции длиной от 1.8 сек. С учетом световой эффективности системы в фотометрическом режиме, равной порядка 40-45%, наблюдениям оказываются доступны объекты от величины 9^m в полосах *JHK*.

Использование кадрирования по вертикали позволяет наблюдать и несколько более яркие объекты (в полосу шириной 1024 пикселя «укладывают» объект и звезду сравнения), но надо учитывать, что измерение потоков, близких или превышающих уровень насыщения, отрицательно действует на последующие измерения на временах многих часов или даже суток

из-за явления *персистенции* (длительного высвечивания части накопленного заряда фотодиодов после засветки большими потоками). Эффект начинает быть заметен, если объект яркий ($< 12^m$) или рядом с ним расположена яркая звезда. Это может ограничивать экспозиции и вводить систематические ошибки в фотометрические данные и служит дополнительным фактором, затрудняющим проведение измерений.

Предельной звездной величиной со стороны слабых объектов для точности фотометрии порядка 10% оказывается $J=20.5^m$, $H=19.5^m$, $K=18.5^m$ при суммарной экспозиции итогового кадра порядка 0.5 часа в режиме дизеринга (сдвиги точки наведения на 3-10 секунд дуги между отдельными накоплениями по 30-100 сек, производимые на прямоугольной сетке экваториальных координат, например формата 3×5).

В общем случае экспозиции необходимые для достижения нужной фотометрической точности дифференциальных фотометрических измерений при хорошей прозрачности, могут быть рассчитаны заявителем исходя из указанного пропускания, апертуры телескопа в 40000 кв.см и с учётом характерных для сезона наблюдений уровней фона и качества изображения (для ориентации см. таблицу 1 ниже). Предельная фотометрическая точность для относительно ярких объектов порядка 0.01^m достигается только в режиме дизеринга и ограничена технологией приёмника, переменностью фона, влиянием персистенции и другими факторами.

Таблица 1. Оценка звездной величины, регистрируемой в разных полосах, в зависимости от суммарного времени накопления и SNR (для среднего уровня фона неба и seeing 1.5")

	t=100s (SNR=100)	t=1000s (SNR=100)	t=1000s (SNR=10)
<i>J</i>	16.4	17.7	20.0
<i>H</i>	15.3	16.5	19.0
<i>K</i>	14.2	15.5	18.0

Накладные расходы:

В расчёт бюджета потребного наблюдательного времени в режиме фотометрии входят следующие компоненты:

1. Время наведения телескопа — от 10 до 60 с
2. Фокусировка — 2 мин, раз в 30–120 минут в зависимости от условий
3. Чистое время экспозиций (см. выше)
4. Время считывания и записи накопленного кадра — от 2 до 5 с
5. Время на перевод фильтров — 20 с
6. Время сдвига телескопа в режиме дизеринга — 3 с.

2. Спектроскопия (режимы LONG и XSPEC)

Основные характеристики:

Разрешающая сила ИК-спектрографа $R=1200$ (для узкой щели во всех полосах). Длина щели в режиме LONG составляет $280''$, в режиме XSPEC — $10''$. Ширины щелей 0.9 , 1.3 , 3 и $7''$. Спектры получаются в режиме неразрушающего считывания с элементарными накоплениями от 3.6 до 1000 с и суммарными экспозициями до 60 минут. Режим и его возможности описаны в статье Желтоухова и др. (2020).

Спектральные наблюдения в ИК выполняются только с автоматическим гидированием по оптической камере внеосевого гида порта Несмита телескопа. При измерениях можно устанавливать необходимый позиционный угол щели. При отсутствии требований по попаданию в щель одновременно исследуемого объекта и звезды сравнения рекомендуется вертикальная ориентация прибора (задание нулевого начального угла ротатора инструмента). Следует помнить, что как и для фотометрии, для каждого момента наблюдения доступна лишь часть диапазона позиционных углов щели, поэтому ограничивать углы без необходимости не следует.

Спектральные диапазоны:

Режимы и диапазоны спектроскопии для ANC в заявке обозначаются именами полос с суффиксом «spec»:

Yspec, *Jspec*, *Hspec*, *Kspec* — однопорядковые (щель длиной $4.6'$) спектры в ИК, в пределах соответствующих полос пропускания:

Yspec : 1.02 – 1.2 мкм

Jspec: 1.21 – 1.48 мкм

Hspec: 1.49 – 1.78 мкм

Kspec: 2.04 – 2.35 мкм

Спектры в режиме кросс-дисперсии занимают более широкие диапазоны:

YJspec: 1.031 – 1.499 мкм

HKspec: 1.505 – 2.464 мкм.

Экспозиции и щели:

Предел по звёздной величине для LONG режима в соответствующей полосе — порядка 14^m и 7^m для XSPEC режима, спектральная разрешающая сила с щелью $0.9''$ $R\sim 1200$, с щелью $1.3''$ $R\sim 900$. По умолчанию используется щель, соответствующая качеству изображения в оптическом диапазоне длин волн: при $\text{seeing} < 1''$ используется щель $0.9''$, от 1 до $1.5''$ — щель $1.3''$, при худшем качестве изображений спектры снимаются только для ярких ($\text{mag} < 7$) объектов. Специальные соображения указываются отдельно (см. ниже). Для оценки достижимого пикового отношения сигнал/шум следует использовать полученные оценки спектральной световой эффективности: 6 - 14% для полос *Yspec*-*Kspec* (режим LONG) и 1 - 2% для полос *YJspec*-*HKspec* (режим XSPEC). На практике, из-за потерь на щели, SNR примерно вдвое ниже оцененного.

Накладные расходы:

Накладные расходы для получения изображений в спектральном режиме примерно такие же, как и в режиме фотометрии. К ним добавляется время центровки объекта на щели, составляющее около 1 минуты на объект в несложных случаях. Автогидирование запускается само и накладных расходов практически не прибавляет.

Литература

1. Желтоухов С.Г., Татарников А.М., Шатский Н.И. Письма в Астрономический журнал, 46, 201, 2020
2. Наджип А.Э., Татарников А.М., Туми Д.У., Шатский Н.И., Черепашук А.М., Ламзин С.А., Белинский А.А. Астрофизический бюллетень, 72, 382, 2017

Камера широкого поля (ПЗС-фотометр) NBI

Статус прибора – общего пользования

Ответственный – О.В. Возякова (olgavoz@gmail.com)

Наблюдательные возможности NBI:

Размер поля зрения оптической камеры — $10' \times 10'$ (минут дуги). Камера представляет собой мозаику из двух чипов $2K \times 4K$ с размером пикселя 15 микрон. Посередине полного кадра $4K \times 4K$ есть слепая полоса стыка между светочувствительными зонами матриц, шириной около $12''$. «Левый» чип — инженерный, его качество из-за “косметики” хуже, чем «правого»; полосу между строками $Y=2890$ и $Y=3130$ использовать для количественных измерений нельзя. В остальном детекторы примерно одинаковы, линейность левого чипа чуть лучше, чем у правого. При обработке в pipeline отчёты до $\sim 300\,000$ ADU линейризуются. Если поле $5' \times 10'$ достаточно, лучше ориентироваться на размещение объектов в поле «правого» чипа. Изображения получаются зеркальными.

Фильтры:

Доступны следующие фильтры:

- широкополосные $U, B, V, Rc, Ic, u_sdss, g_sdss, r_sdss, i_sdss, z_sdss$
- узкополосные $H\alpha, H\beta, [OIII], [OIII]rc, [SII], [SII]rc, H\beta c, H\beta c c$

Идентификатор конкретного фильтра, соответствующего полосе (например «F002BBES» для фильтра B), будет указан в заголовке FITS-файла в поле FILTERID и по нему однозначно определяются все характеристики фильтра и кривые пропускания (см. <https://arca.sai.msu.ru/filters?ics=NBI>).

Экспозиции:

Снимки выполняются в режиме фотометрии light, доступны экспозиции длиной от 0.1 сек (после ввода штормного затвора Bonn Shutter), но такие короткие выдержки используются обычно лишь для плоских полей (режим flat). Оценить предельные характеристики снимков можно исходя из следующих параметров системы:

1. Площадь свободной от экранирования апертуры телескопа 40000 кв. см.
2. Пропускание атмосферы (коэффициент экстинкции) в полосе I порядка 0.15^m вел, V — 0.2^m , U — 0.4^m .
3. Полное пропускание оптики (зеркала M1 и M2 и оптическое окно криостата) — 65%.
4. Масштаб изображения 0.155 секунд дуги на пиксель
5. Фон неба порядка 21^m в полосе V с квадратной секунды.
6. Шум считывания на рабочей скорости оцифровки 6.2 e- (левый детектор) и 6.4 e- (правый детектор)

7. Коэффициент усиления (gain) ~ 0.27 e-/ADU (левый детектор) и 0.28 e-/ADU (правый детектор)

Кривые пропускания фильтров описаны выше. Темновой шум отсутствует. Предельная звёздная величина слабых объектов для точности фотометрии порядка 10% составляет около 23^m. Экспозиции более 20 минут применять не рекомендуется, поскольку иногда при считывании кадра появляются наводки, ухудшающие его качество. В таком случае сбой в считывании кадра длительной экспозиции приведёт к существенной потере наблюдательного времени. Режим бинирования также следует избегать из-за артефактов при устранении подложки, определяемой по 50-пиксельным зонам псевдо-оверскана справа и слева от фоточувствительной зоны приемников.

Накладные расходы:

В расчёт бюджета потребного наблюдательного времени в режиме фотометрии входят следующие компоненты (кроме чистого времени экспозиций):

1. Время наведения телескопа — от 10 до 60 с;
2. Фокусировка — 2.5 мин, раз в 30 — 120 минут в зависимости от условий;
3. Время считывания и записи накопленного полного кадра — 20 секунд;
4. Время на перевод фильтров — 2-8 с;

К ним добавляется время центровки объекта, если указанные заявителем сдвиги центра поля зрения по отношению к данным координатам объекта и/или ориентация кадров оказываются неоптимальными, составляющее около 2-3 минут на объект. Автогидирование запускается само и накладных расходов не прибавляет.

Более подробное описание прибора и дополнительные требования к заявке на наблюдательное время можно найти по ссылке http://lnfm1.sai.msu.ru/kgoinstruments/app_form/instruct_proposal_NBI.pdf

Спекл-поляриметр SPP

Статус прибора – авторский

Ответственный – Сафонов Б.С. (safonov@sai.msu.ru)

Основные характеристики:

Спекл-поляриметр – это авторский прибор 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ, предназначенный для исследования пространственной структуры и поляризации астрофизических объектов с дифракционным разрешением в диапазоне длин волн от 400 до 1100 нм. Конструктивно спекл-поляриметр представляет собой комбинацию двухлучевого поляриметра с вращающейся полуволновой пластинкой и спекл-интерферометра на базе быстрой ПЗС-матрицы с электронным усилением. Угловой масштаб составляет 0.0206"/пкс, поле зрения прямоугольное размерами 5"×10". Предельное разрешение дифракционное 0.055" в полосе *V* и 0.086" в полосе *I*. Для реализации методов достижения дифракционного разрешения необходимо применять компенсатор атмосферной дисперсии, который входит в состав прибора. Для компенсатора доступны высоты более 40 градусов.

Подробное описание прибора и его возможностей доступны по ссылке http://lnfm1.sai.msu.ru/kgoinstruments/app_form/instruct_proposal_SPP.pdf

За консультациями по постановке и проведению наблюдений следует обращаться к разработчику прибора Б.С. Сафонову (safonov@sai.msu.ru).

Фильтры:

Прибор может работать в стандартных полосах *VRI* и среднеполосных фильтрах центрированных на 550, 625 и 880 нм, с полуширинами 50, 50 и 80 нм, соответственно. Доступен также фильтр *Halp* полушириной 8 нм. Широкополосные фильтры рекомендуется применять при поляриметрии и спекл-интерферометрии, дифференциальной спекл-поляриметрии слабых объектов (слабее 8 величины в *V*). Для спекл-интерферометрии, дифференциальной спекл-поляриметрии ярких (ярче 8 величины в *V*) объектов рекомендуются среднеполосные фильтры.

Методы:

Спекл-интерферометрия. Метод спекл-интерферометрии (Лабейри и др. 1970) позволяет достигать дифракционного углового разрешения при наблюдении объектов малых угловых размеров (звезд) ярче 13-14 величины (полосы *V-I*). Предпочтительные задачи: обнаружение и исследование двойственности звезд. Для объектов 10 величины возможно обнаружение компонент на 4-5 величин слабее главного на расстоянии 0.4" от центральной звезды. Данные полученные в режимах **INTERF** и **FASTPOL** могут быть обработаны методом спекл-интерферометрии. Примеры работ с результатами полученными методом спекл-интерферометрии на спекл-поляриметре: Ховричев и др 2016, Сафонов и др 2017, Emelyanov et al 2019, Cabot et al 2021).

Поляриметрия. Метод измерения интегральной поляризации излучения небесных тел. Схема прибора позволяет измерять поляризацию с высокой точностью - 10^{-4} от объекта $V=12^m$ за 15 минут накопления при монтаже в фокусе Кассегрена. В фокусе Нэсмита точность ограничивается коррекцией за инструментальную поляризацию и составляет 0.15%. Предельная величина составляет $V=16^m$. Данные полученные в режимах **STERPOL** и **FASTPOL** могут быть обработаны методом поляриметрии. Первый предпочтителен для слабых объектов. Примеры работ: Dodin et al, 2019, Dodin et al 2020.

Дифференциальная спекл-поляриметрия. Метод получения информации о распределении поляризованного потока с дифракционным разрешением ([Сафонов и др., 2019](#)). Этот относительно новый метод, похожий на предложенный в работе Норриса и др. (2012), полезен для изучения околозвездного окружения молодых звезд и звезд на поздних стадиях эволюции. Основной наблюдаемой величиной является дифференциальная поляризационная видность - отношение видностей в ортогональных поляризациях. Возможно также и восстановление изображения околозвездной оболочки в поляризованном потоке. Для объектов $V=7^m$ достигается контраст 1:1000 по поляризованному потоку на расстоянии 0.2" от звезды. Предельная величина такая же как для спекл-интерферометрии: 13^m - 14^m . Дифференциальная спекл-поляриметрия может быть применена к данным полученным в режиме **FASTPOL**. Примеры работ: Safonov et al 2019, Safonov et al 2019b, Fedotyeva et al 2020, Safonov et al 2020, Safonov et al 2021.

Быстрая фотометрия (режим FASTPHOT). Детектор, используемый в спекл-поляриметре, позволяет получать изображение точечного объекта с частотой до 1000 кадров в секунду. Эти изображения затем могут быть использованы для оценки потока. Быстрая фотометрия может быть применена, например, при наблюдении покрытий звезд луной.

Накладные расходы:

В расчёт бюджета потребного наблюдательного времени входят следующие компоненты (кроме чистого времени экспозиций):

1. Время наведения телескопа: от 10 до 60 с;
2. Фокусировка: 2,5 мин, раз в 30–120 минут в зависимости от условий;
3. Время на перевод фильтров: 2-8 с.

Литература

1. Сафонов Б.С., Лысенко Павел Александрович, Додин А.В., ПАЖ, 43, 5, 383-404, 2017
2. Safonov B., Lysenko P., Goliguzova M., Cheryasov D., MNRAS, 484, 4, 5129-5141, 2019
3. Ховричев М.Ю., Куликова А.М., Соков Е.Н., Дьяченко В.В., Растегаев Д.А., Бескакотов А.С., Балеха Ю.Ю., Сафонов Б.С., Додин А.В., Возякова О.В., ПАЖ, 42, № 10, с. 754-761, 2016
4. Emelyanov N.V., Safonov B.S., Kupreeva C.D., MNRAS, т. 489, с. 3953-3965
5. Cabot Samuel H.C., Bello-Arufe Aaron, Mendonça João M., et al., AJ 162, № 5, с. 218, 2021
6. Dodin A., Grankin K., Lamzin S., Nadjip A., Safonov B., Shakhovskoi D., Shenavrin V., Tatarnikov A., Vozyakova O. MNRAS, т. 482, № 4, с. 5524-5541, 2019
7. Dodin A., Lamzin S., Petrov P., Safonov B., Takami M., Tatarnikov A., MNRAS, т. 497, № 4, с. 4322-4332, 2020
8. Fedoteva A.A., Tatarnikov A.M., Safonov B.S., Shenavrin V.I., Komissarova G.V., Ast. Lett. 46, № 1, с. 38-57, 2020
9. Safonov B.S., Dodin A.V., Lamzin S.A., Rastorguev A.S., Ast. Lett. 45, № 7, с. 453-461, 2019
10. Safonov Boris S., Strakhov Ivan A., Goliguzova Maria V., Voziakova Olga V. AJ, 163, № 1, с. 31, 2021