

# Отчёт об испытаниях системы снижения влияния засветки неба на астрономические наблюдения DarkSkyProtector Outdoor Lighting System: Astronomical Test Report

А.А. Белинский, О.В. Возякова, Е.О. Мишин,  
Б.С. Сафонов, Н.И. Шатский

Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ имени М.В.Ломоносова

## 1 Abstract

29 June 2019 test observations were performed at the 60-cm telescope of the Caucasus mountain observatory of the Sternberg astronomical institute (Lomonosov Moscow state university) with the “DarkSkyProtector Outdoor Lighting System” developed for an artificial light pollution suppression in astronomical observations. Test “street” light sources were installed nearby the telescope which modulated ( $f = 150$  Hz) illumination boosted the local sky background from  $V = 21^m$  up to  $V = 19.6^m$  per square arcsecond. Using a synchronous disk shutter with the light loss ratio of 40%, the direct CCD stellar images of several sky areas were obtained. The measurement of sky background in these areas demonstrated a nearly complete cutoff of the additional light pollution (leaking factor 6%). The intrinsic quality of differential aperture stellar photometry remains good ( $\sigma = 0.003^m$ ); the width of stellar image profiles has minorly increased (by  $\approx 0.3''$ ). Recommendations are given to overcome a number of uncovered technological issues (system control improvement, lowering electromagnetic interference, vibrations and light losses). Thus upgraded, the technology may be incorporated in background-limited astronomical observations to gain in signal to noise ratio at the sites where the respective modernisation of the nearby infrastructure objects is possible

29 мая 2019 г. были проведены испытания системы подавления засветки неба DarkSkyProtector Outdoor Lighting System на базе 60-см телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Были установлены тестовые источники засветки с модулированным излучением ( $f = 150$  Гц), увеличившие яркость фона неба на обсерватории с  $V = 21^m$  до  $V = 19.6^m$  с квадратной секунды дуги. Используя синхронный obtюратор с долей потерь света в 40%, удалось получить прямые ПЗС-изображения звёздных площадок с практически первоначальным, неувеличенным уровнем яркости фона неба (утечка засветки около 6%). Внутренняя точность измерений методом дифференциальной апертурной фотометрии звёзд осталась хорошей ( $\sigma = 0.003^m$ ); выявлено незначительное увеличение ширины звёздных изображений (на  $\approx 0.3''$ ). Выработаны рекомендации по устранению обнаруженных технологических недостатков

(улучшению управления затвором, снижению уровня электромагнитных шумов, вибраций и потерь света), что позволит применять разрабатываемую технологию для повышения отношения сигнала к шуму в фоно-ограниченных наблюдениях на обсерваториях, где возможна модернизация систем наружного освещения инфраструктуры близлежащих объектов.

## 2 Введение

Система защиты от избыточной засветки неба разрабатывается для снижения влияния местных уличных источников освещения на астрономические наблюдения, конкретно — на уровень засветки неба. Принцип работы состоит в применении высокочастотной ( $>100$  Гц) модуляции излучения источников местного освещения и синхронной работы быстрого затвора, перекрывающего научный приёмник телескопа в те моменты, когда происходят вспышки источников освещения. Выбираемая частота модуляции достаточно высока, чтобы сделать её незаметной и безопасной для зрения<sup>1</sup>. Разработчиком планируется внедрение системы в тех местах, где невозможно устранить местную засветку, но есть возможность модернизации её источников так, чтобы снизить их влияние на работу астрономической обсерватории, находящейся вблизи источника засветки (предприятия по разработке полезных ископаемых, горнолыжные курорты, небольшие посёлки и т.п.). В качестве первого этапа разработки был изготовлен макет системы, испытания которого в реальных астрономических наблюдениях описаны в настоящем документе.

## 3 Цель испытаний

Проверить на практике работу макета оборудования, состоящего из тестовых источников модулированного освещения, имитирующих местную засветку, механического затвора обтюраторного типа и аппаратуры модуляции и синхронизации работы затвора и источников. Выявить слабые места системы и факторы неблагоприятного воздействия на телескоп и приёмную аппаратуру для астрономических наблюдений, получить количественные оценки степени подавления засветки (эффективность работы системы) и выигрыша от применения системы с точки зрения предельных возможностей астрономических наблюдений в условиях искусственной засветки неба.

## 4 Исследуемый случай применения

Для испытаний выбран наиболее простой тип астрономических наблюдений — фотометрические наблюдения с прямыми снимками на ПЗС-матрицу в широкополосной фотометрической системе Джонсона. Уровень фона измерялся по снимкам звёздных площадок, полученным в фильтре  $V$  ( $\lambda=550$  нм,  $fwhm=100$

---

<sup>1</sup> Следует заметить, что вопрос граничной частоты пульсаций света, безопасной для глаз человека, полностью не закрыт. Требуются изучение источников и, возможно, дополнительные исследования по возможным последствиям долговременного воздействия пульсирующего ночного освещения на физиологию живых организмов.

нм) с 60-сантиметровым телескопом системы Ричи-Кретьена F/7 фирмы ASA, установленным на Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ имени Ломоносова. Выбор этого случая вполне обоснован, поскольку применяемые в современных источниках освещения яркие светодиоды имеют непрерывный спектр излучения и его влияние на широкополосные, узкополосные или спектральные оптические наблюдения будет сходным и отличающимся лишь соотношением светосилы инструмента (телескопа и приёмной аппаратуры) и ширины используемой спектральной полосы.

Исследовалось влияние применения синхронного затвора на качество получаемых изображений, чувствительность (пропускание) системы и подавление создаваемой рядом с телескопом искусственной засветки неба. В качестве научного приёмника применяется ПЗС-камера Andor Ikon-L формата 2048x2048 пикселей (матрица E2V CCD42-40, размер пиксела 13.5x13.5 мкм, масштаб изображения 0.67" на пиксел).

## 5 Описание установки 5.1

### Источник освещения



Рис. 1: Источник дополнительной засветки

Таблица 1: Технические параметры осветительной системы

Параметр	Значение
Количество светильников, шт	2
Размер одного светильника, мм	810 x 994
Суммарная мощность светильников, Вт	1920
Суммарный световой поток светильников, лм	224000
Цветовая температура светодиодов, К	5000
Высота расположения светильников относительно поверхности земли, м	4.5
Расстояние до телескопа, м	35
Размеры отражающего покрытия на поверхности земли	5.5 x 6.0 м
Частота следования импульсов, Гц	150
Длительность импульсов (скважность 20%), мкс	1333

Использованный в испытаниях источник представляет собой две мачты со светодиодными прожекторами, направленными вниз на подстилающую поверхность для создания равномерной зацветки неба над установкой, слабо зависящей азимута и высоты наблюдений (рис. 1). Параметры осветителей даны в таблице 1. Для рассеяния света использовалось вафельное текстильное полотно, имитирующее снежный покров, которым была выстелена площадка непосредственно под светильниками, что предположительно создаёт квази-ламбертовское рассеяние. Этим удалось на практике достичь приемлемой однородности и стабильности фона неба, измеряемой с использованным в эксперименте телескопом на перемещающихся вращением неба тестовых площадках неба.

Источник может включаться в непрерывном режиме и в режиме с модуляцией. В эксперименте использовалась скважность импульсов света 20%. Расстояние и мощность светильников были выбраны предварительным расчётом ожидаемого уровня дополнительной яркости фона неба в предположении релеевского рассеяния воздуха без пыли и аэрозоли. От прямого освещения подкупольного пространства телескоп был защищён специальной светозащитной шторой, установленной в проёме щели башни телескопа и полностью затенявшей трубу телескопа.

## 5.2 Синхронный затвор

В качестве быстрого синхронного затвора был использован трёхлопастной обтюратор, установленный прямо на оси синхронного электродвигателя, вращаемого преобразователем частоты (рис. 2, таб. 2).

Частота и фаза вращения активно управляются блоком синхронизации, в который поступают сигналы меандра, задающего начало импульсов источников

излучения, и оптической пары, регистрирующей прохождение края сектора обтюратора. Подстройка фазового сдвига между этими сигналами является наиболее тонким моментом настройки всей системы.

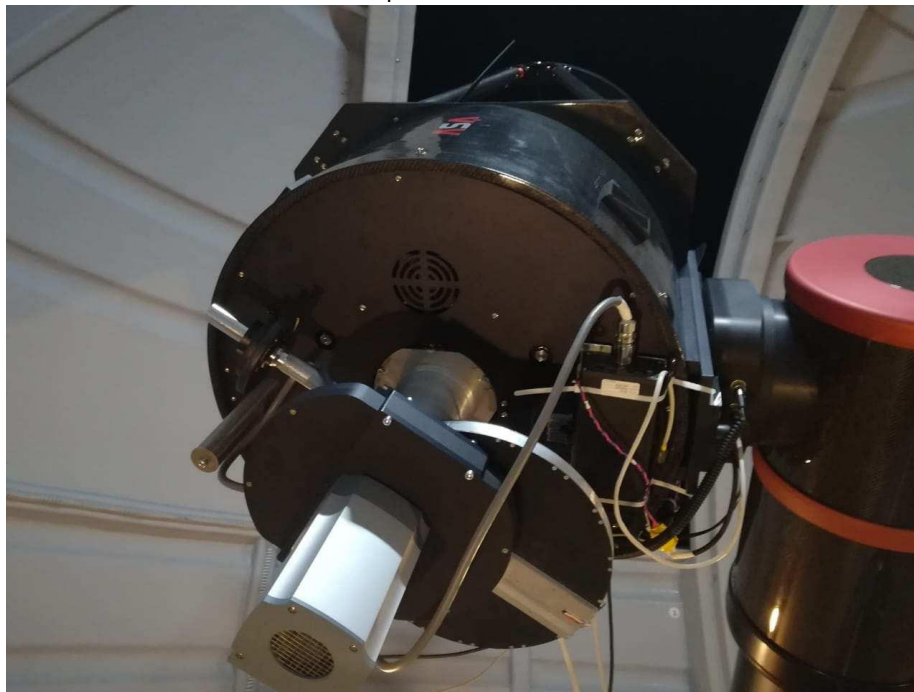


Рис. 2: Камера, блок фильтров и синхронный затвор (видны корпус обтюратора и тубус, слева – штанга с противовесом), установленные на 60-см телескопе

Таблица 2: Технические параметры синхронного затвора

Параметр	Значение
Диаметр корпуса обтюратора, мм	360
Число лопастей обтюратора	3
Угол лопасти обтюратора, гр.	48
Высота вдоль оптической оси, мм	250
Расстояние от оси вращения до центра окна, мм	130
Свободная апертура, мм	47 x 47
Расстояние от обтюратора до фокальной плоскости, мм	100
Мощность двигателя, Вт	700
Рабочая частота вращения, Гц	50
Максимальная частота вращения, Гц	333
Вес затвора в сборе, кг	12

Исходя из геометрии обтюратора, работающий затвор имеет эффективное пропускание 60%. Соотношение скважности импульсов и ширины сектора диктуется необходимостью полного перекрытия апертуры ПЗС-матрицы во

время вспышки диодов осветителей, в продолжение которой диск продолжает вращаться, а также расстоянием от диска до приёмника.

В корпусе obtюратора предусмотрено гнездо для крепления просветлённого оптического окна  $d=75$  мм,  $th=4$  мм на случай, если создаваемая незащищённым затвором турбулентность будет ощутимо влиять на качество получаемых изображений. В описываемом эксперименте окно не устанавливалось.

Блок затвора устанавливается в просвет заднего отрезка системы телескопа, составляющий на телескопе ASA RC600 около 300 мм, что типично для телескопов также и среднего размера. Корпус затвора в нашем случае полностью заменил штатный переходник между оправой главного зеркала и блоком фильтров, оставив практически неизменной фокусировку телескопа.

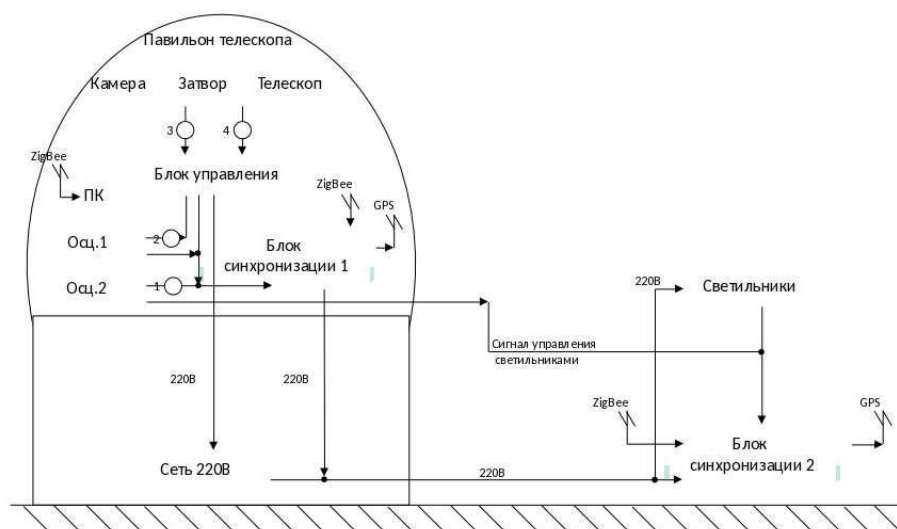


Рис. 3: Схема испытательной установки: 1 – сигнал синхронизации затвора; 2,3 – сигнал оптопары; 4 – сигнал управления асинхронным электродвигателем

Общая схема синхронизации системы показана на рис. 3. Каждый из компонентов системы отдельно синхронизован при помощи сигналов 1PPS GPS. Для взаимной синхронизации (фазировки) источников и затвора использовалась радиолиния интерфейса ZigBee. Управление системой осуществлялось с ноутбука из аппаратного помещения башни телескопа. Расположение системы на местности дано на рис. 4.

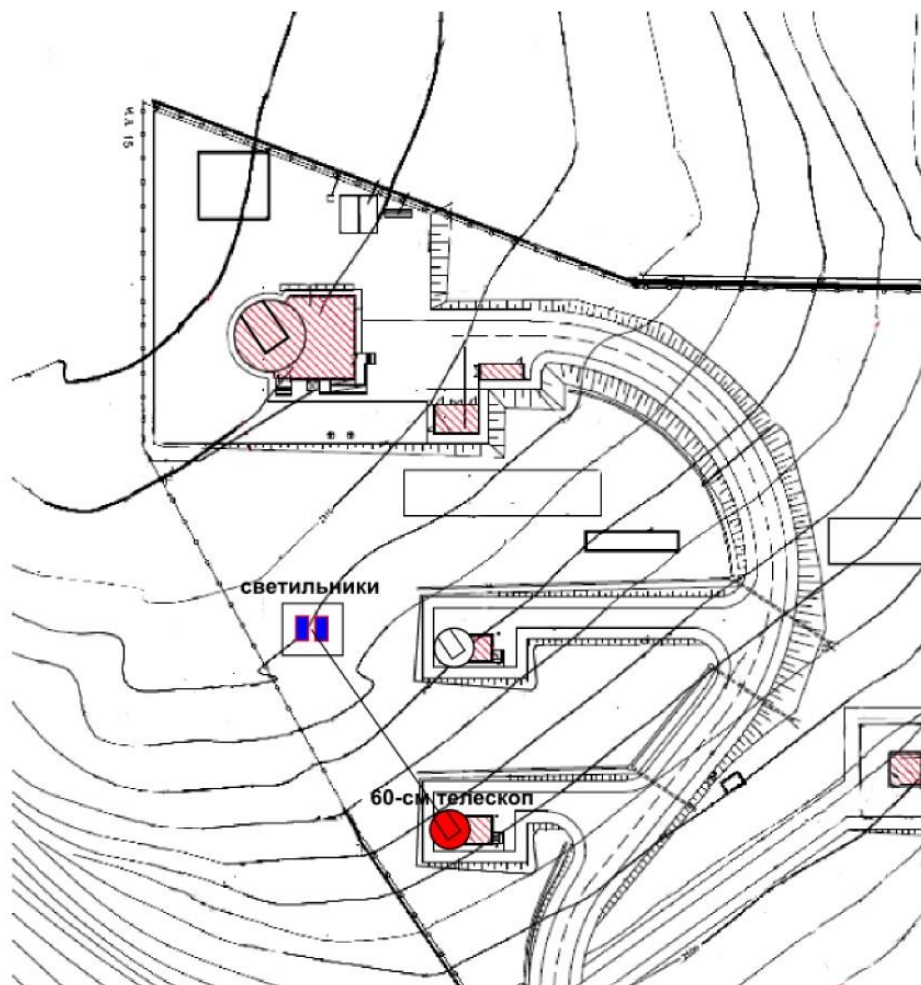


Рис. 4: Расположение светильников и телескопа на наблюдательной площадке КГО ГАИШ. Север справа, восток внизу. Вверху – башня 2.5-метрового телескопа

## 6 Эксперимент

Наблюдения с установленным на телескоп затвором были выполнены 29 мая 2019 года. Погода в период наблюдений была влажная, прозрачность испытывала существенные вариации, строго говоря не позволяющие выполнять абсолютные фотометрические оценки. Однако во время проведения самих измерений, судя по стабильности отсчётов фона (таб.3) и звёзд в поле зрения, прозрачность держалась на постоянном уровне.

Измерения с матрицей выполнялись с экспозицией 120 секунд в фотометрической полосе  $V$  (используются фильтры фирмы Astrodon), в режиме Preampr 4 на частоте считывания 1 МГц (то есть быстрое считывание в режиме высокой чувствительности, наиболее подходящее для фотометрической работы). Было выполнено три цикла измерений, в каждом из них

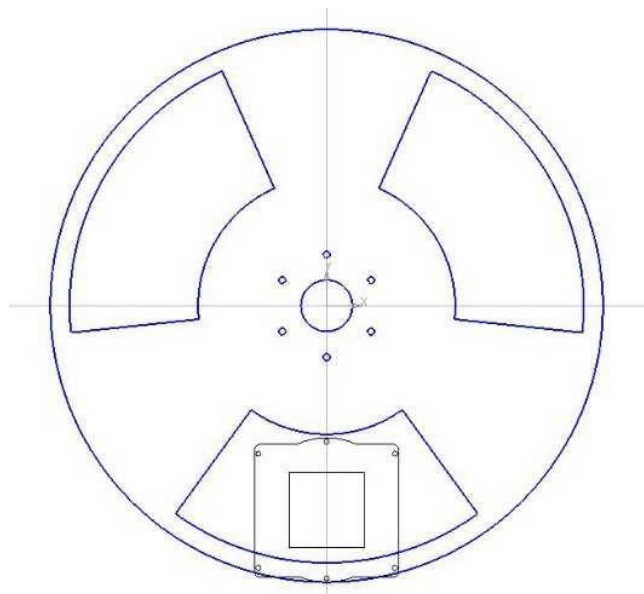


Рис. 5: Диск obtюратора с наложенным на него изображением фланца ПЗСкамеры и отсекающей диафрагмы, где может быть установлено оптическое окно.

снимались кадры с выключенным (остановленном в открытом положении) obtюратором без засветки, с включённым источником засветки, с включённым и синхронизованным затвором и с выключенным источником света (для подтверждения величины эффективного поглощения затвора).

В процессе настройки системы и выполнения измерений был выяснен ряд практических недостатков системы:

1. Синхронизация затвора потребовала дополнительную ручную настройку с осциллографом.
2. Несмотря на тщательную балансировку в лаборатории, вращающийся obtюратор даёт ощутимую вибрацию закреплённой на нём камеры и блока фильтров. Измерить её величину напрямую не представилось возможным, но длительная вибрация такого рода может плохо сказываться на точной аппаратуре. Влияние её на изображения обсуждается ниже.
3. Работающий затвор создаёт большой шум, сходный по силе и тембру с шумом бытового пылесоса. Для автоматизированных и удалённо управляемых телескопов это, впрочем, не так важно.
4. На кадрах ПЗС-матрицы, получаемых во время работы затвора, видны следы электромагнитных помех.
5. Для работы без затвора лезвие obtюратора должно останавливаться в гарантированно открытом положении; при эксперименте ротор мотора приходилось доворачивать руками по метке.



Иллюстрацией к работе затвора может служить Рис. 6, где показаны четыре полученных при эксперименте кадра с одной и той же областью неба, снятые в разных условиях: с естественным фоном и дополнительной засветкой, с затвором и без него. Видно изменение уровня фона неба и понижение яркости изображений звёзд в нижнем ряду по сравнению с верхним. Уровень фона в кадрах нижнего ряда отличается мало.

При обработке данных из полученных кадров был вычтен усреднённый кадр т.н. «подложки» (*master-bias*), убирающий постоянную составляющую сигнала, не имеющую отношения к истинному фону неба. Затем полученные отсчёты были исправлены за неравномерность чувствительности системы по полю зрения путём деления на т.н. *master-flat*, усреднённый кадр «плоского поля». Таким образом, отсчёты на кадре стали прямо соответствовать фотоэлектронам за время экспозиции кадра, собираемым с соответствующих площадок неба, содержащих изображение звёзд и фона неба.

## 7 Результаты

В таблице 3 даны количественные результаты выполненных измерений и их обработки. Здесь даны экваториальные и горизонтальные небесные координаты центра снимаемой площадки (азимут указан геодезический, отсчитывается от точки севера на восток). В следующих колонках даны измеренный уровень фона неба в расчёте на квадратную угловую секунду, измеренный и ожидаемый из фотонной статистики шум фона неба и оценка дополнительного шума:

$$extra\_noise = \sqrt{pBkgr\_RMS^2 - phot\_noise^2 - RON^2}$$

Учитываемый здесь шум считывания матрицы в использованном режиме составляет  $RON = 7.38ADU$ , коэффициент усиления  $GAIN = 1e-/ADU$ . По этой причине значения потоков в таб. 3, данные в отсчётах АЦП камеры (ADU), практически соответствуют фотоэлектронам. Дисперсия отсчётов фона неба с выключенным затвором оказалась полностью соответствующей ожидаемой фотонной статистике, то есть дополнительный шум либо отсутствует, либо пренебрежимо мал. Измеренный же дополнительный шум кадров с работающим затвором отражает уровень наводки на сигнал ПЗСматрицы, который в эксперименте был обнаружен при включении двигателя затвора (нижний ряд изображений на рис. 6; см. также рис. 10). Как видно, в нашем случае он преобладает над шумом самого фона неба.

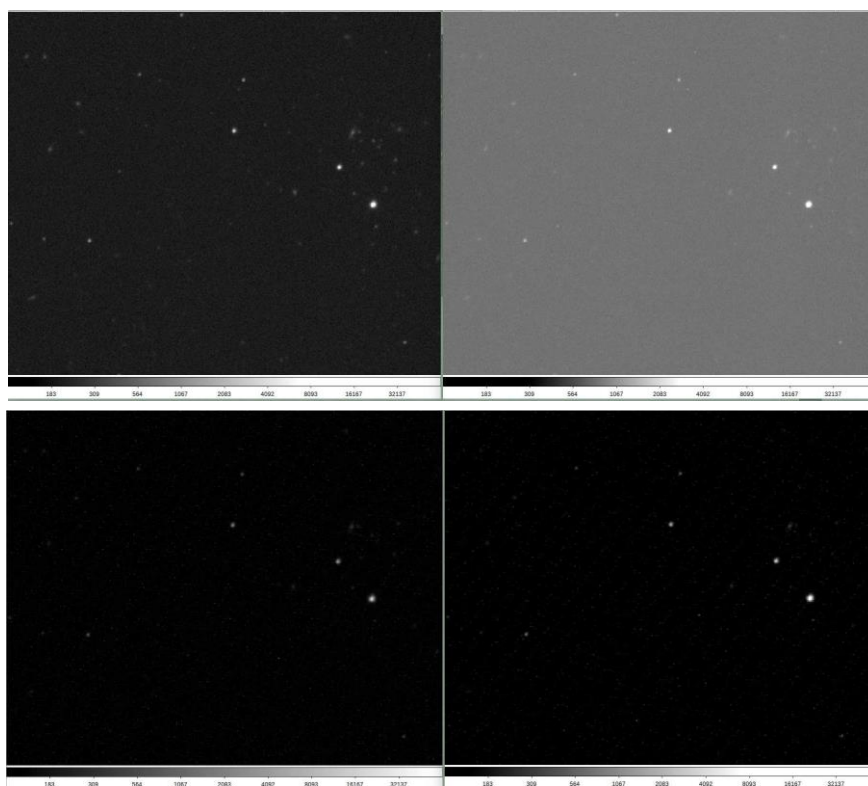
В колонке *FWHM* дана измеренная полуширина изображений звёзд (*full width at half maximum*), по которой можно судить о влиянии создаваемой затвором вибрации на качество изображений. В последней колонке даны ссылки на данные ниже таблицы примечания.

Ниже даётся интерпретация полученных данных по пунктам.

## 7.1 Фон неба и фотометрия

Средний уровень фона в безлунье в КГО, по данным астроклиматических исследований, составляет порядка  $skyb = 21^m/square''$  (звёздных величин)

Рис. 6: Снимки неба с разной засветкой и работой затвора. Верхний ряд: слева кадр 69 – подсветка и затвор выключены; справа кадр 70 – с подсветкой без затвора. Нижний ряд: кадр 76 – затвор работает, подсветки нет; справа кадр 73 – подсветка и затвор включены. Шкала интенсивностей везде одинаковая (логарифмическая); в нижнем ряду изображений видны цепочки точек наводки от мотора синхронного затвора.



Цикл	Img No	UT	RA2000	DEC2000	Shtr	Light	Alt	Az	Bkgr	Bkgr	Phot	Extra	fwhm "	Прим.
									ADU	RMS	Noise	Noise		
									/кв."	ADU	ADU	ADU		
									/px	/px	/px			
1	69	19:44:01	13 22 09	+22 57 02	0	0	60.4	233	456	15.5	14.4	0.0	1.9	1
	70	19:46:39	13 22 09	+22 57 02	0	1	60.0	234	1781	28.8	28.6	0.0	2.1	
	71	19:49:04	13 22 09	+22 57 02	0	1	59.7	235	1778	29.5	28.5	1.1	2.4	
	73	19:54:53	13 22 09	+22 57 02	1	1	58.8	237	296	21.2	11.7	16.1	1.9	
	75	19:58:11	13 22 09	+22 57 02	1	1	58.3	238	308	22.7	11.9	17.9	2.3	
	76	20:01:16	13 22 09	+22 57 02	1	0	57.8	239	286	22.0	11.4	17.3	2.2	
	77	20:03:29	13 22 09	+22 57 02	1	0	57.5	240	287	22.6	11.5	18.0	2.2	
2	78	20:15:35	13 42 26	+22 56 38	0	0	58.7	237	457	15.6	14.5	0.0	2.2	3
	79	20:18:20	13 42 26	+22 56 38	0	0	58.3	238	470	15.4	14.7	0.0	1.7	
	80	20:21:04	13 42 26	+22 56 38	0	1	57.9	239	1639	28.4	27.4	1.1	2.2	
	81	20:23:14	13 42 26	+22 56 38	0	1	57.5	240	1661	27.6	27.6	0.0	2.2	
	3	20:52:41	13 42 26	+22 56 38	1	1	52.7	248	291	22.2	11.5	17.5	2.7	
	4	20:54:51	13 42 26	+22 56 38	1	1	52.4	249	305	22.4	11.8	17.5	2.6	
	6	21:09:08	13 42 26	+22 56 38	1	1	49.9	252	6748	61.3	55.6	24.7	2.6	
	7	21:13:11	13 42 26	+22 56 38	1	0	49.2	253	299	22.7	11.7	18.0	2.7	

Таблица 3: Результаты измерений

Таблица 3: Результаты измерений

3	8	21:15:23	13 42 26	+22 56 38	1	0	48.8	254	292	21.9	11.6	17.1	2.4	
	9	21:20:36	14 48 27	+22 54 56	0	0	58.8	237	452	15.0	14.4	0.0	2.0	
	10	21:22:45	14 48 27	+22 54 56	0	0	58.5	238	450	15.9	14.4	0.0	2.0	
	11	21:25:07	14 48 27	+22 54 56	0	1	58.1	239	1584	26.7	26.9	0.0	2.0	
	12	21:27:22	14 48 27	+22 54 56	0	1	57.8	239	1582	27.5	26.9	0.0	2.2	
	17	21:48:44	14 48 27	+22 54 56	1	1	54.4	246	363	22.3	12.9	16.6	2.4	5
	18	21:50:53	14 48 27	+22 54 56	1	1	54.0	246	329	22.1	12.3	16.8	2.2	6
	20	21:56:21	14 48 27	+22 54 56	1	1	53.1	248	324	21.9	12.2	16.6	2.4	
	23	22:03:09	14 42 32	+20 21 43	1	0	49.2	248	322	21.0	12.1	15.5	2.7	
	24	22:09:26	14 47 51	+23 00 04	1	0	50.8	251	325	21.8	12.2	16.5	2.7	
	26	22:12:31	15 27 46	+22 58 51	1	0	56.9	241	305	22.0	11.8	17.0	2.5	

Примечания:

- 1 Заметны кольца радиусом порядка размера кадра, центр за левым краем
- 2 Неравномерная засветка кадра 130->170 ADU
- 3 Засвечен правый нижний угол 127->145 ADU
- 4 Очень засвечен правый нижний угол 1000->8000 ADU
- 5 Верх и низ кадра засвечен сильнее середины 160->180ADU
- 6 Верх кадра засвечен 140->180
- 7 Дополнительно пытались включить еще один синхронизированный светильник под куполом, синхронизации не добились.

с квадратной угловой секунды; квантили распределения: 25% –  $21.3^m$ , 50% –  $21.1^m$ , 75% –  $20.8^m$ ; см.[1]). Полезно дать формулу для соответствующего ожидаемого уровня фона за время экспозиции кадра:

$$Bkgr_{theor} = ZV \times 10^{-0.4(skyb+P)} \times \pi D_1^2 / 4 \times \rho \times T^2 \times F \times QE \times Expt$$

где

$ZV=0.88E+6$  – поток квантов от звезды 0-й величины спектрального класса A0 в полосе  $V$  на 1 кв. см в секунду за атмосферой; (так называемый нуль-пункт фотометрической системы, см. [2]);  $D_1$  –

диаметр телескопа, 60 см;

$\rho$  – коэффициент центрального экранирования площади,  $\rho = 1 - (D_2/D_1)^2 = 0.82$ ;

$P$  – коэффициент прозрачности атмосферы в полосе  $V$ ,  $P \approx 0.2 \times \text{cosec}(Alt)$ , где 0.2 – средний коэффициент экстинкции в полосе  $V$  (см. ниже);  $T$  – коэффициенты отражения зеркал телескопа,  $T = 0.85$ ;

$F$  – общий коэффициент пропускания фильтра  $V$  и окна ПЗС-камеры в максимуме чувствительности,  $F = 0.9$ ;

$QE$  – квантовая эффективность применяемого ПЗС-приёмника в районе длины волны 550 нм,  $QE = 0.9$ ;

$Expt$  – время экспозиции, 120 сек.

Для наших условий эксперимента  $Bkgr_{theor}$  составляет 460 фотоэлектронов (для уровня фона  $21^m$ ). Как видно, полученный на практике медианный отсчёт в режиме Shutter=0 и Light=0 (то есть без затвора и подсветки), 457 ADU (таблица 4), весьма точно соответствует этому значению.

Параллельно с научными наблюдениями на обсерватории работает астроклиматический монитор (АСМ), определяющий качество изображения (сиинг, т.е. текущий атмосферный угловой размер точечных объектов), экстинкцию (поглощение света в зените), фон неба и метеопараметры (рис. 7 и 8). По данным АСМ медианный фон неба в период эксперимента был  $21.97^m$  в полосе MASS (между  $B$  и  $V$  Джонсона), что соответствует  $V = 21.31^m$ . Экстинкция колебалась со стандартным отклонением  $0.03^m$  и размахом (peak-to-peak)  $0.08^m$  вокруг медианного значения  $0.49^m$  в полосе MASS ( $0.35^m$  в  $V$ ). Поскольку фотометрия прибора MASS ведется относительно приборного нуль-пункта, можно утверждать, что экстинкция была не выше  $0.35^m$ , а фон не слабее  $21.31^m$  в  $V$ , что, в целом, совпадает с данными выше предположениями.

Таблица 4: Осредненные результаты измерений фона за 120 сек

	без освещения без затвора	освещение без затвора	освещение с затвором	без освещения с затвором
средний фон ADU/кв."	457±7.6	1671±89.8	317±24.6	302±15.9
средний фон ADU/px	205	750	142	136

Таким образом, данный в таблице 4 фон неба без дополнительной засветки может быть уверенно приписан 21-й звёздной величине в полосе  $V$ , а почти четырёхкратный уровень фона с дополнительной засветкой (1671 фотоэлектрон с квадратной секунды дуги), соответственно, – величине  $V=19.6^m$  с квадратной секунды. Это соответствует ситуации серьёзной засветки в условиях астрономической обсерватории.

Измеренные относительные звездные величины ярких звезд на разных кадрах совпадают с точностью  $0.003^m$ , что свидетельствует об однородности поглощения по кадрам и пригодности их к фотометрической обработке. При работающем затворе отсчёт на звезду падает на  $40\% \pm 0.3\%$ , что совпадает с геометрическими параметрами обтюратора. Также ведёт себя и уровень фона.

Осреднённые измерения фона в эксперименте с затвором приведены в таблице 4. Видно, что затвор снижает фоновую засветку приблизительно в три раза (приводя её почти к исходному значению без дополнительной подсветки, но с учётом потерь света на затворе), при том, что отсчёт от звезды падает только на 40%. Проведя более точные вычисления, получаем, что затвор без синхронизации оставил бы 60% света, то есть, при имеющемся уровне засветки, 1003 ADU/кв."; с синхронизацией же мы получили всего 317 ADU/кв.". Естественный фон за такую же эффективную экспозицию  $120 \times 0.6 = 72$  сек составит  $457 \times 0.6 = 274$  ADU/кв.", то есть, синхронный затвор пропускает только около 6% дополнительной засветки:  $(317-274)/(1003-274)$ .

Обсуждение выигрыша от комбинации снижения измеряемого уровня фона и потерь времени экспозиции см. ниже в разделе 8.1.

## 7.2 Атмосферный сиинг, погода и $FWHM$ изображений звёзд

По данным астроклиматического комплекса медианный сиинг во время проведения эксперимента был равен  $0.89''$  (рис. 7), скорость ветра не превышала 3–4 метров в секунду (рис. 8), следовательно, ветровая вибрация телескопа не влияла на качество снимков (к тому же телескоп был защищён шторой).  $FWHM$  изображений звёзд в центральных областях кадров получились значительно больше сиинга: без затвора медианная  $FWHM = 2.1''$ , с затвором  $FWHM = 2.4''$ . Размывание изображений можно объяснить отчасти аберрациями недоюстированной оптической системы недавно установленного телескопа. Вибрация затвора, очевидно, тоже увеличивает ширину изображений – сравнить контурные изображения звезды, снятой с

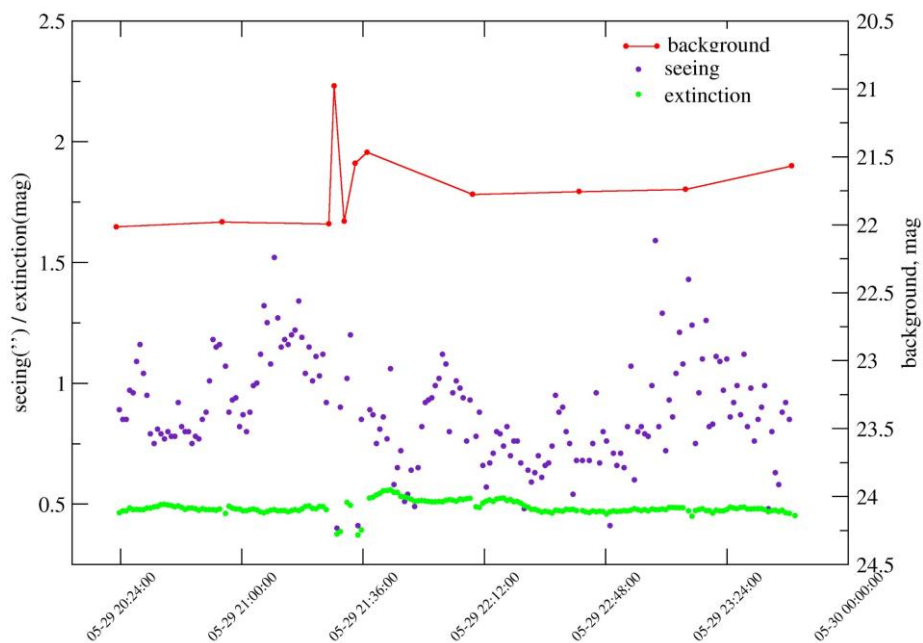


Рис. 7: Фотометрические условия на обсерватории в период наблюдений: уровень фона (полоса прибора MASS – между  $B$  и  $V$  Джонсона) и относительная атмосферная экстинкция в звездных величинах, качество изображений в секундах дуги.

затвором и без можно, рассматривая картинки на Рис. 9. Однако с полученным качеством изображений оценить этот эффект надёжно количественно не представляется возможным и приходится довольствоваться субъективными оценками, приведёнными выше в описании эксперимента.

### 7.3 Шум затвора

Колонка *ExtraNoise* в таблице 3 даёт представления о дополнительном шуме, вносимом работающим затвором. Медианное значение  $ExtraNoise = 17 \text{ ADU/px}$ . Характерный узор наводок затвора виден и на кадрах (см. рис. 10).

Данный шум может генерироваться мотором затвора, управляемым преобразователем частоты, имеющим относительно высокую несущую частоту. Эти наводки в данном случае портят статистику фоновых отсчётов очень существенно, что нивелирует выигрыш от понижения фона неба за счёт применения затвора в задачах, им ограниченных.

26 июня был проведён дополнительный эксперимент, в котором мы попытались снизить влияние наводки в условиях, схожих с наблюдательными от 29 мая. Заземление корпуса преобразователя на колонну телескопа и, дополнительно, применение заземлённого со стороны преобразователя экранированного кабеля питания мотора, позволило достичь уровня суммарного шума в 11–12 ADU. С учётом вклада шума считывания ПЗС в 7.38

ADU, это соответствует дополнительному шуму от наводки в 8–9 ADU, существенно

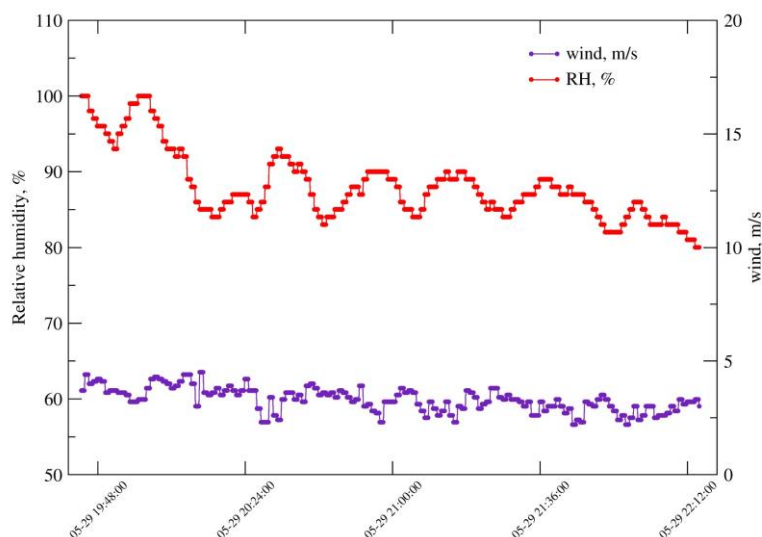


Рис. 8: Влажность и скорость ветра по данным метеостанции обсерватории.

ниже, чем было при наблюдениях, однако всё же больше, чем собственные шумы приёмника. С такой помеховой обстановкой результаты фотометрических глубоких (фонов-ограниченных) измерений заметно ухудшаются, а проведение предельных спектральных измерений (обычно имеющих уровни шумов от 3–4 электрона) подрывается полностью.

## 8 Выводы

Выводы проведённых испытаний естественно раскладываются на две составляющие – вопросы эффективности применения технологии как таковой, с учётом известных и обнаруженных ограничений, и особенности конкретной реализации, требующие улучшения.

### 8.1 Влияние на отношение сигнал/шум в данных

Об эффективности применения системы подавления засветки, как и любых наблюдательных методик в экспериментальной астрономии, принято судить по отношению сигнала к шуму слабых звёзд. Условно предельно низким отношением в астротометрии считается  $S/N = 10$  ( $\approx 0.1^m$ ); неплохое  $S/N$  начинается со 100 ( $\approx 0.01^m$ ).



Для оценки отношения на примере «типичного» измерения мы взяли квазар 2MASS J14475885+2257335,  $V = 17.87^m$ , изображения которого на наших кадрах дали отсчёт 15780 ADU над фоном за 120 сек (см. конец раздела 7.1). Сравнение отношений сигнал/шум в диафрагме диаметром 13.4" (20px) для этого объекта в разных условиях фоновой засветки приведены

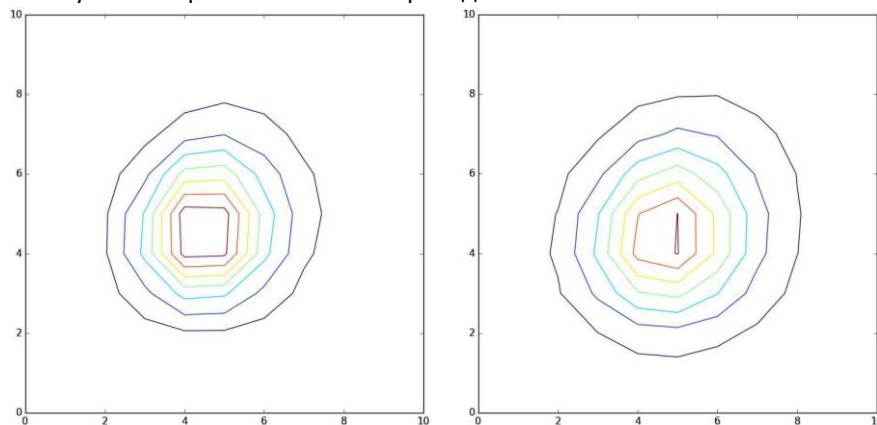


Рис. 9: Звёздное изображение в центре кадра. Слева: кадр 69,  $fwhm = 1.9''$  (без дополнительной засветки и затвора); справа: кадр 75,  $fwhm = 2.3''$  (подсветка и затвор включены)

в таблице 5. Мы рассмотрели случаи засветки, созданной в эксперименте и существенно более серьёзной, граничащей с ситуацией, когда обсерваторию нужно закрывать. Экспозиция «брутто» 120 сек, шум затвора *ExtraNoise* в пикселе взят 17 ADU, как было измерено.

Из таблицы следует, что в ситуации с реально измеренным дополнительным шумом от затвора, накапливающимся в кружке, в котором производится суммирование сигнала (20 пикселей) методом апертурной фотометрии, применение затвора фактически не приносит выгоды. При устранении дополнительного шума затвор позволит несколько увеличить глубину снимка и в условиях нашего эксперимента ( $-1.4^m$  к фону в КГО и  $-2.4^m$  к фону в самых «тёмных» местах на Земле), и в случае очень высокой засветки ( $-3.0^m$  к фону в КГО), хотя достичь ситуации тёмного неба, увы, не удастся, в основном, из-за неизбежных потерь света на затворе. «Отыграть» получается весьма немного, по сравнению с величиной потерь точности измерений от наличия повышенного фона.

В идеальной ситуации (затвор не шумит, изображения звезд стабильны по кадру) можно поднять отношение сигнал/шум за счёт минимизации апертуры, в которой суммируется сигнал от объекта при измерении его яркости. Это соответствует применению исследуемой технологии в местах с хорошим качеством изображений, например, высокогорных обсерваториях.

Уменьшение потерь сигнала при вдвое более узких лепестках обтюратора (20% времени затвор открыт) также заметно улучшает фотометрический предел. Именно эта величина потерь может рассматриваться как предельно допустимая

в практических применениях в астрономии, однако она требует или пропорционального уменьшения скважности световых импульсов (порядка 10%, что необходимо для сохранения полного перекрытия потока на научный приёмник во время вспышек при механическом типе синхронного затвора) или применения принципиально другого вида затвора (типа ячеек Керра или жидких кристаллов).

Оценочные расчеты для разных диаметров «диафрагм» (апертур) сум

Таблица 5: Отношения сигнал/шум за 120 сек при разных условиях съёмки. Шум оценивается в диафрагме диаметром 13.4" (20px), в качестве шума затвора принята величина 17 ADU. Отсчёт 15780 ADU соответствует звезде  $V \approx 17.9^m$ . Фон и шумы выражены в ADU в пикселе

	фон ADU в px	сигнал в диафр.	шум в диафр. теор	шум в диафр. extra	S/N теор	S/N extra
без освещения без затвора	205	15780	312	-	51	-
с освещением без затвора	750	15780	518	-	30	-
с затвором	142	9468*	266	402	35	24
фон $-3.0^m$ без затвора	3249	15780	1026	-	15	-
с затвором	618**	9468*	314	435	30	22

\* Затвор остаётся открытым 60% времени экспозиции

\*\* «утечка» фона считалась как постоянная доля от дополнительной застветки (5.8%) исходя из данных эксперимента

Таблица 6: Расчётные отношения сигнал/шум при потерях 40% и 20% времени экспозиции. Экспозиция «брутто» 120 сек. Шум оценивается в двух апертурах для объектов разной яркости. Шум затвора не учитывался.

	bright	faint	very faint
фон	$\approx 15.4^m$ 160000 ADU	$\approx 17.9^m$ 16000 ADU	$\approx 20.4^m$ 1600 ADU

диаметр апертуры 13.4" (20px)

natural 205 ADU/px			
shutter 0	325	51	5.5
experiment 750 ADU/px			
shutter 0	249	31	3.2
shutter 40%	242	36	3.8
shutter 20%	283	43	4.6

natural-3,0 <sup>m</sup> = 3249 ADU/px			
shutter 0	146	16	1.6
shutter 40%1*	223	31	3.2
shutter 20%1*	260	36	3.8

Диаметр апертуры 6,7" (10px)

natural 205 ADU/px			
shutter 0	377	84	11
experiment 750 ADU/px			
shutter 0	339	57	6.3
shutter 40%	288	61	7.5
shutter 20%	334	72	9.0
natural-3,0 <sup>m</sup> = 3249 ADU/px			
shutter 0	247	30	3.1
shutter 40%1*	279	54	6.3
shutter 20%1*	324	63	7.4

\* «утечка» фона считалась как постоянная доля от дополнительной засветки (5.8%) исходя из данных эксперимента



Рис. 10: Два снимка одного и того же поля. Слева: кадр 76, затвор работает; справа: кадр 69, затвор выключен. На кадре слева виден характерный узор наводок от затвора в виде белых и темных пикселей.

мирования потока при измерениях, долей потерь света на затворе и звездных величин приведены в таблице 6. При расчетах отношения сигнал-шума для другой скважности затвора и большем уровне засветки принимались предположения о постоянной доле пропускания дополнительной засветки, на практике всё может быть иначе, так как зависит от природы остаточной «неотрезанной» засветки (послесвечение диодов светильников, рассеяние в затворе? Это требует дополнительного исследования).

В дополнение к приведённым в таблице 6 данным, можно рассмотреть идеальный случай малозумящей камеры, когда при работе с синхронным затвором можно подойти довольно близко к условиям незасвеченного неба, если применять длинные экспозиции. Например, для рассмотренной в эксперименте звезды  $20.4^m$  и дополнительной засветки в  $-1.4^m$  к естественному фону, с камерой с шумом считывания всего в  $\approx 3e^-$  за 1000 секунд мы получим  $S/N = 29$  при включенной засветке и 35 при естественном фоне, в то время как при 120 секундах те же значения будут равны 6.5 и 12 соответственно.

Таким образом, существенного (в полтора и более раз) увеличения качества данных, по сравнению с измерениями в условиях засветки и без затвора, действительно можно достичь, применяя затворы с умеренной (не более 20%) долей потерь света и без дополнительных шумов и других, в принципе устранимых, недостатков (см. раздел 8.2). Это показывает условную применимость рассматриваемой технологии в реальных астрономических наблюдениях.

Со стороны ярких объектов следует, в общем, очевидный для астрономов-наблюдателей вывод: в условиях умеренной, не предельной засветки применение даже идеального (нешумящего) затвора в случае ярких объектов неэффективно, то есть синхронный затвор – прибор, применяемый селективно.

Наконец, последний, третий вывод исследования: каково бы ни было соотношение размеров апертур, яркостей объектов и реальных потерь на затворе, применение этой технологии никогда не позволит полностью устранить эффект даже модулированной засветки. Иными словами, технология Dark Sky Protector не является «индугенцией» для девелоперов; любое развитие производств и инфраструктуры вблизи астрономических обсерваторий неизбежно губит их эффективность.

## 8.2 Проблемы текущей реализации и возможности исправления

Испытанная модель затвора вносит дополнительный шум около 12–17 ADU/px, что пока не позволяет получить серьёзный выигрыш в предельной величине, а при уровне засветки, как в эксперименте, даже слегка ухудшает отношение сигнал/шум (раздел 7.3 и таблица 5). Размещение сравнительно мощного электродвигателя рядом с чувствительным приёмником ставит серьёзную задачу устранения влияния наводок от силовых цепей на сигнал научного приёмника.

Медианная *FWHM* звезд на кадрах, полученных с затвором, на  $0.3''$  больше, чем на кадрах без затвора (раздел 7.2). Хотя точное количественное определение вызванной вибрацией «смаза» изображений в проведённом эксперименте и не оказалось возможным, эта величина для наблюдений в местах с хорошим атмосферным качеством изображений уже существенна. Кроме того, как уже сказано выше, долговременное сотрясение ПЗС-приёмников, особенно тонких кристаллов с обратным освещением, является опасным мероприятием. Поэтому требуются дальнейшие меры по балансировке обтюратора или иному способу преодоления вибрации (вызванной, возможно, и акустическими волнами).

Наконец, из приведённых выше выкладок очевидно, что в задачах, не ограниченных шумом естественного или умеренно повышенного фона (например, спектроскопия высокого разрешения) применение затвора приводит лишь к увеличению потребного времени экспозиции. Поэтому внедрение этой технологии немыслимо без возможности оперативно выключить затвор при измерениях ярких объектов, автоматически оставив его в гарантированно открытом положении, не приводящем к виньетированию пучков света, поступающего на приёмник.

## Список литературы

- [1] Kornilov, V.; Kornilov, M.; Voziakova, O.; Shatsky, N.; Safonov, B.; Gorbunov, I V., "Night-sky brightness and extinction at Mt Shatdzhatmaz", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 462, Issue 4, p.4464-4472
- [2] Bessel, M. S., "UBVRI photometry II: the Cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry.", Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol (1979)