

СПЕКТРАЛЬНЫЙ РЕЖИМ КАМЕРЫ ASTRONIRCAM

© 2020 г. С. Г. Желтоухов¹, А. М. Татарников^{1*}, Н. И. Шатский¹

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия

Поступила в редакцию 02.12.2019 г.

После доработки 02.12.2019 г.; принята к публикации 05.12.2019 г.

Изложен алгоритм редукции спектральных наблюдений с камерой-спектрографом ASTRONIRCAM, установленной на 2.5-м телескопе ГАИШ МГУ. Прибор позволяет получать спектры астрономических объектов с длинными (280") и короткими (10") щелями в диапазоне длин волн от 1 до 2.5 мкм. Измеренная разрешающая способность достигает $R = 1270$ для щели 0.9", световая эффективность системы меняется от 6 до 14% в рабочем диапазоне длин волн в режиме длинной щели и от 1 до 2% в режиме кросс-дисперсии. Пропускание ограничено качеством используемых гризм. Получены оценки доли рассеянного света, изучены механические гнутия и температурные дрейфы конструкции.

Ключевые слова: инфракрасный диапазон: общие вопросы, инструменты: спектрографы, методы: спектроскопия, методы: редукция наблюдений.

DOI: 10.31857/S0320010820020059

ВВЕДЕНИЕ

ASTRONIRCAM (The ASTROnomical NearInfraRed CAMera) — инфракрасный инструмент, установленный на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (Садовничий, Черепашук, 2015). Камера работает в диапазоне длин волн от 1 до 2.5 мкм в двух режимах — фотометрическом (получение прямых снимков неба в фильтрах ЖНК фотометрической системы МКО и нескольких узкополосных фильтрах) и спектральном (получение спектров низкого разрешения с длинной или короткой щелью). Конструкция камеры, оптическая схема, параметры детектора и схемы регистрации описаны в статье Наджиба и др. (2017).

Основным элементом камеры является HgCdTe матрица HAWAII-2RG формата 2048 × 2048 с размером пиксела 18 мкм. Квантовая эффективность приемника в рабочем диапазоне длин волн ~94%, шум считывания $12e^-$, емкость пикселей $\sim 120\,000e^-$. Изображение на приемнике формируется оптической схемой, состоящей из входного окна, фокальной турели с входной диафрагмой и набором из 10 спектральных щелей, коллиматора, двух турелей фильтров, камерного объектива. Для сокращения объема, занимаемого камерой, используются три диагональных зеркала, "складывающихся" оптическую схему. Для уменьшения

количества рассеянного света между оптическими элементами установлены диафрагмы. Все элементы находятся в криостате на оптической скамье, охлаждаемой жидким азотом. Оцифровка и регистрация сигнала осуществляются контроллером ARC Gen III (Лич, Лоу, 2000). Для калибровки в спектральном режиме используется калибровочный блок, содержащий лампу накаливания и аргоновую лампу с линейчатым спектром.

Камера работает в режиме попиксельного неразрушающего считывания, что позволяет неоднократно считывать данные с детектора в ходе накопления сигнала, но ставит ограничение на минимально возможную экспозицию — примерно 3.6 с при работе в полнокадровом режиме. Результатом накопления сигнала является куб данных, каждая плоскость которого содержит результат однократного считывания данных с детектора. Обработка куба данных позволяет избавиться от влияния неравномерности и шума подложки (bias), исправить результат воздействия космических частиц и переполнение емкости ячейки в ходе накопления.

Целью настоящей работы были разработка и реализация алгоритма первичной редукции получаемых спектральных данных, а также исследование характеристик спектрального режима инструмента ASTRONIRCAM.

*Электронный адрес: andrew@sai.msu.ru

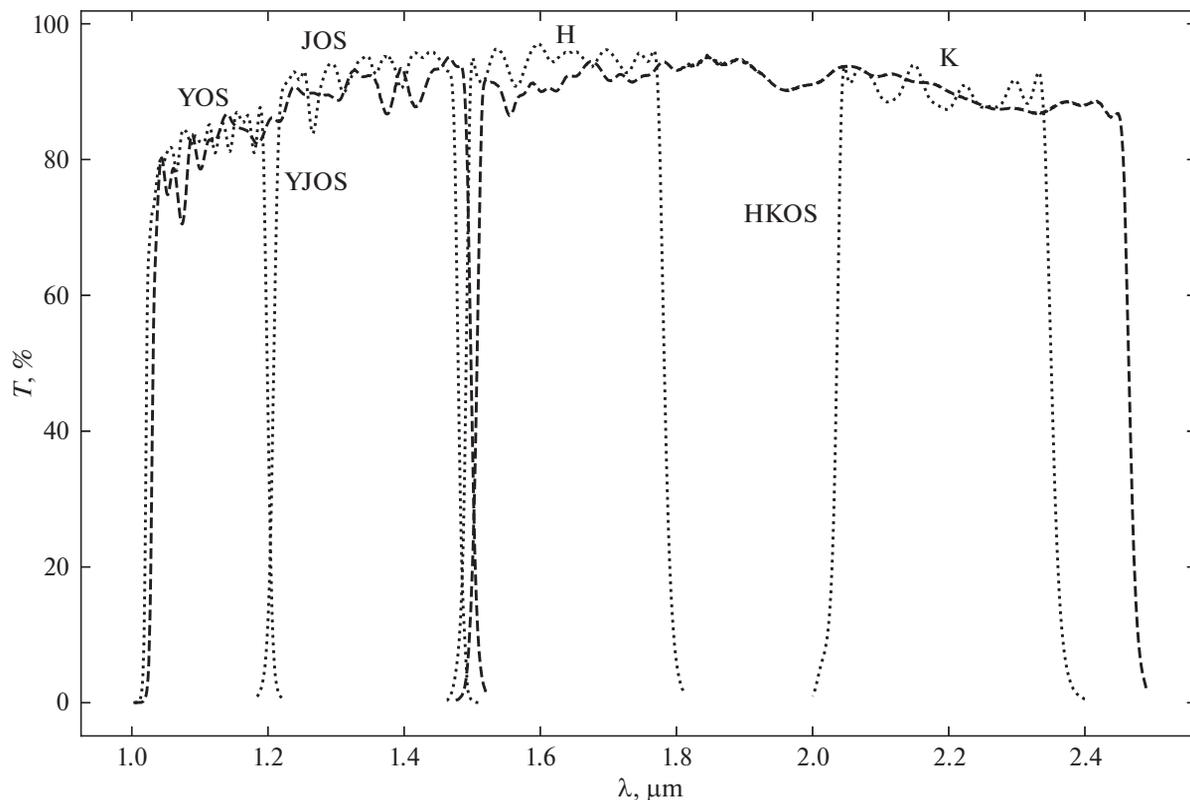


Рис. 1. Кривые пропускания фильтров, выделяющих различные спектральные диапазоны длин волн.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ASTRONIRCAM

Спектральный режим в ASTRONIRCAM реализован с помощью гризм, нарезанных на призмах из ZnSe. Они установлены в двух турелях фильтров вблизи зрачка оптической системы: в одной две вспомогательные гризмы для реализации режима кросс-дисперсии (65 и 81 штрихов/мм), работающие в порядке 1, во второй — основная гризма (162 штриха/мм), работающая в порядках 3–6 (в зависимости от требуемого спектрального диапазона).

При работе в спектральном режиме используется одна из 10 сменных щелей, установленных в фокальной турели. Пять щелей имеют длину около 1 мм (slit2–slit6), пять щелей — около 27 мм (slit7–slit11). С учетом масштаба в фокальной плоскости 10.3"/мм, это соответствует угловым длинам 10" и 280" соответственно. В режиме кросс-дисперсии используются только короткие щели. В каждом комплекте имеются щели шириной 0".9, 1".3, 1".8, 2".7 и 7".2 (в проекции на небо).

Для отсекаения нерабочих порядков при наблюдениях без гризм кросс-дисперсии используются специальные светофильтры YOS (Y Order Sorter), JOS (J Order Sorter) и фотометрические

фильтры H и K, установленные в том же колесе фильтров, что и гризмы кросс-дисперсии. Светофильтры для отсекаения лишних порядков в режиме кросс-дисперсии (YJOS и HKOS) наклеены непосредственно на соответствующие кросс-дисперсионные гризмы. При работе в режиме кросс-дисперсии на одном кадре получаются спектры сразу двух диапазонов, соответствующих светофильтрам YOS + JOS или H + K. Кривые пропускания фильтров, отсекающих нерабочие порядки, приведены на рис. 1.

Перед входным окном камеры установлено подвижное плоское зеркало, с помощью которого можно направлять свет от калибровочного блока на входную щель. Калибровочный блок оснащен двумя источниками света (аргоновой лампой и лампой накаливания), интегрирующей сферой и конденсором. Примеры калибровочных кадров, полученных с длинной щелью и в режиме кросс-дисперсии, показаны на рис. 2.

ПОДГОТОВКА КАЛИБРОВОЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим сначала работу спектрографа в режиме длинной щели. Наблюдения с ней могут проводиться в одном из четырех спектральных диапазонов в зависимости от используемого фильтра

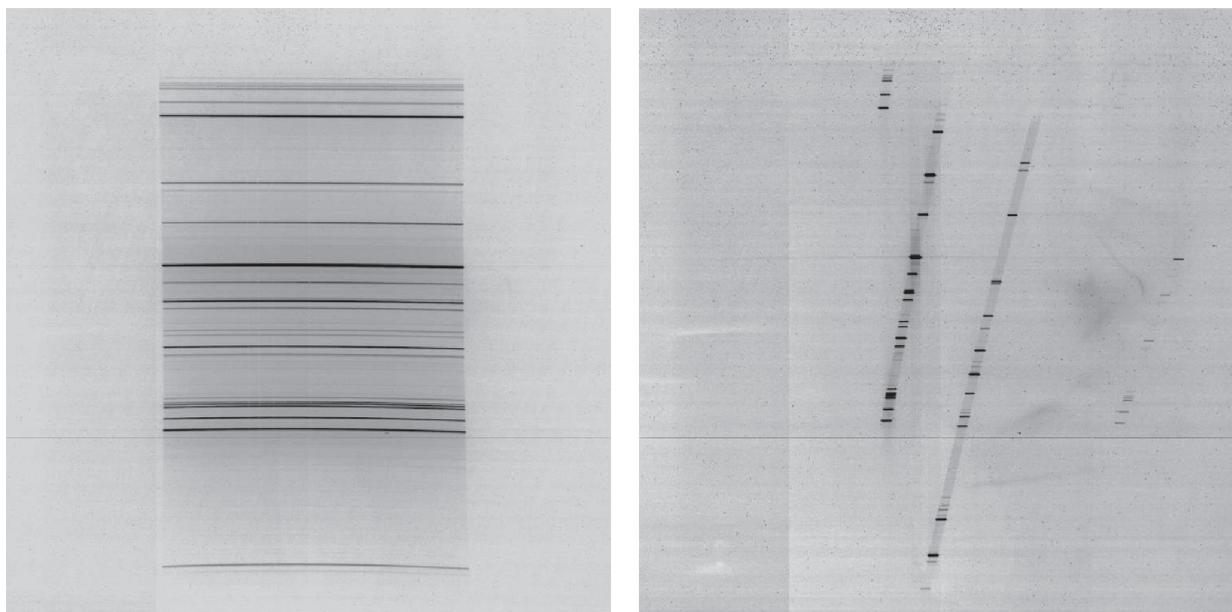


Рис. 2. Примеры спектров аргоновой лампы в режиме длинной щели (слева) и кросс-дисперсии (справа).

сортировки порядков: YOS, JOS, H и K (рис. 1). Получаемый спектр отягощен геометрическими искажениями: кривизной монохроматического изображения щели, зависящей от длины волны, и разным наклоном спектра объекта по отношению к направлению колонок детектора, зависящим от положения объекта на щели.

Редукция рабочих спектров выполняется с помощью заранее подготовленных матриц и полиномов коррекции. Они строятся по спектрам аргоновой лампы, лампы накаливания и звездным спектрам примерно раз в сезон наблюдений.

Сначала рассчитываются матрицы смещений для выпрямления монохроматических изображений щели. Для этого используется следующий алгоритм:

1. Получаются снимки спектров калибровочной аргоновой лампы.
2. В спектре в направлении дисперсии определяется положение локальных максимумов, соответствующих спектральным линиям (при этом не используются близко расположенные линии).
3. Каждая из найденных спектральных линий делится на малые участки длиной 10 пикселей, для которых определяются координаты центра линии на оси, перпендикулярной щели. Принимая положение одного из краев спектра за неискаженное, получаем зависимость смещения центра профиля линии от координат на кадре для каждой из отобранных ранее линий.

4. Полученные смещения аппроксимируются двумерным полиномом степени от 2 до 4 в зависимости от спектрального диапазона.

5. Оставшиеся после исправления кривизны линий систематические отклонения положений центров линий от прямой с амплитудой до 0.2 пиксела не зависят от места линии в спектре, но зависят от диапазона (YOS, JOS, H или K), в котором производится калибровка. Остаточное искривление достаточно быстро меняется вдоль щели, и поэтому для окончательного исправления кривизны используется полином 10-й степени (по числу нулей функции остаточных отклонений) по координате вдоль щели.

Результатом работы алгоритма для каждого спектрального диапазона является попиксельная матрица значений, сдвигом на которую в произвольном спектре исправляется кривизна спектральных линий. В среднем полуамплитуда остаточных отклонений не превышает 0.05 пиксела (порядка 1.3 мкм или 0.013'' в фокальной плоскости). Наличие этих отклонений, возможно, связано с ошибками изготовления щелей.

Наклон спектра, разный для разных точек щели, исправляется по нескольким спектрам звезды в каждом из рабочих спектральных диапазонов, полученным при различном положении звезды вдоль щели. Как и в случае исправления кривизны спектральной линии, алгоритм ищет спектр звезды на изображении. Затем спектр разбивается вдоль направления дисперсии на малые участки длиной

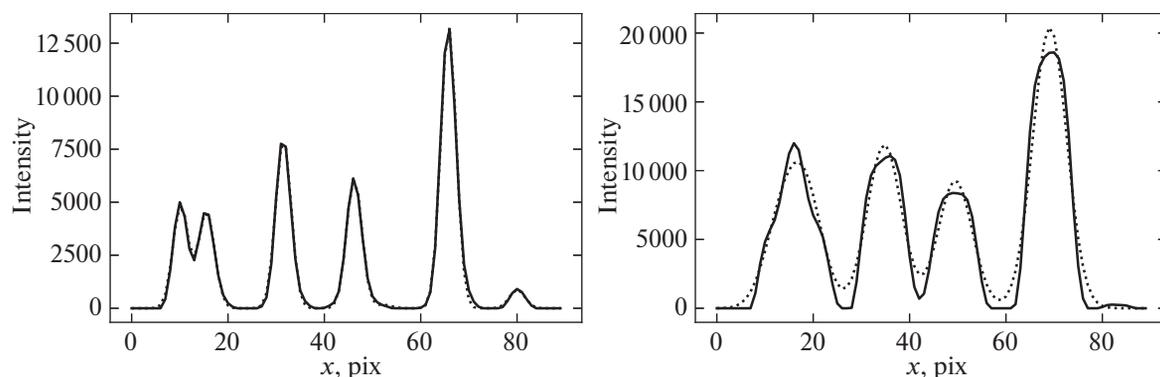


Рис. 3. Пример аппроксимации участка реального калибровочного спектра (сплошная линия) модельным (пунктирная линия) для щелей $0.9''$ и $2.7''$.

20 пикселей, усредняется вдоль этого же направления, и аппроксимацией функцией Гаусса определяется центр каждого из участков. Найденные таким образом положения аппроксимируются двумерным полиномом 3–4-й степени. Максимальное измеренное изменение пространственного масштаба спектра составляет 8 пикселей при длине в 1200 пикселей, т.е. менее 1%.

После применения описанной процедуры Y координате кадра (отсчитывается вдоль направления дисперсии) соответствует некоторая длина волны, а X координате — положение вдоль щели. Дисперсионная кривая строится по спектру калибровочной аргоновой лампы (Рао и др., 1966). Для этого спектр, полученный в каждом из диапазонов, аппроксимируется модельным спектром. Искомые параметрами выступают коэффициенты дисперсионной кривой и коэффициенты, описывающие форму линий (используется профиль Гаусса). В результате зависимость длины волны от координаты на изображении описывается полиномом степени 3. Используемый профиль линии хорошо описывает инструментальный контур для узких щелей. Для самых широких щелей требования к точности определения дисперсионной кривой снижаются и также достаточно использования профиля Гаусса. Примеры аппроксимации реального калибровочного спектра модельным приведены на рис. 3.

Таким образом, в результате работы алгоритма из калибровочных спектров аргоновой лампы получается попиксельная матрица смещений, необходимых для выпрямления спектра, и зависимость координаты на кадре от длины волны (дисперсионная кривая).

При наблюдениях в режиме кросс-дисперсии используется короткая щель, а рабочие порядки спектров получают наклонными относительно направления дисперсии основной призмы.

Получение матриц смещений для режима кросс-дисперсии начинается с определения накло-

на рабочих порядков спектра, вызванного действием дополнительной призмы. Для этого используется непрерывный спектр калибровочной лампы накаливания. Изображение каждого порядка спектра в направлении дисперсии разбивается на несколько десятков участков, для каждого из которых путем аппроксимации прямоугольным профилем с экспоненциальными крыльями определяется центр изображения. Полученный набор положений центра полосы аппроксимируется полиномом третьего порядка. Скорректированный за наклон порядков спектр, так же как и спектр с длинной щелью, имеет искривленные линии и неравномерный угловой масштаб. Однако из-за в 30 раз более короткой щели эти эффекты оказываются пренебрежимо малы, и их исправление не производится. Существенным оказывается только наклон линий внутри одного порядка, составляющий чуть менее одного пикселя на всю длину щели. Для учета этого линия аппроксимируется линейной функцией, и наклон исправляется аналогично другим геометрическим искажениям.

Дисперсионная кривая для наблюдений в режиме кросс-дисперсии строится так же, как и в режиме длинной щели.

ПЕРВИЧНАЯ РЕДУКЦИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Редукция данных инфракрасных наблюдений значительно отличается от редукции данных оптических наблюдений. Процедура усложняется как особенностями детекторов, например, работой в режиме неразрушающего считывания и нелинейностью детектора во всем рабочем диапазоне сигнала, так и наличием сильных и переменных полос атмосферного поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне (Вакка и др., 2003; Чилингарян и др., 2015).

Процедура обработки начинается с удаления плохих пикселей, которое выполняется по заранее

подготовленной карте расположения таких пикселей (Масленникова и др., 2020). После этого снимки исправляются за нелинейность чувствительности детектора. Одновременно с этим корректируются значения в тех пикселях, в которых в ходе накопления произошло переполнение емкости ячейки. Это возможно сделать из-за работы детектора в режиме неразрушающего считывания — значение сигнала восстанавливается по тому участку кривой накопления сигнала, на котором он был меньше полной емкости ячейки.

На вход процедуры коррекции геометрических искажений поступают либо отдельные кадры со спектрами, либо кадры с попарными разностями спектров объектов, полученными в режиме “dithering” (наблюдения с малыми смещениями объекта вдоль щели спектрографа между экспозициями). При этом исправляются кривизна линий и наклон спектра для наблюдений в режиме длинной щели, а также наклон порядков и наклон спектральных линий для режима кросс-дисперсии. В завершение первичной обработки в заголовок FITS-файла с изображением спектра добавляются коэффициенты дисперсионной кривой.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОГРАФА ASTRONIRCAM

Спектральная разрешающая сила

При построении дисперсионных кривых одновременно с их параметрами получают данные о ширине линий и соответственно разрешающей

Таблица 1. Спектральная разрешающая сила спектрографа ASTRONIRCAM с различными щелями

Диапазон/ Щель	<i>YOS</i>	<i>JOS</i>	<i>H</i>	<i>K</i>
	1.12 мкм	1.33 мкм	1.65 мкм	2.2 мкм
0.9''	1270	1040	1030	1200
1.3''	980	850	840	940
1.8''	780	720	700	740
2.7''	510	490	490	490

Таблица 2. Световая эффективность спектрографа

λ , мкм	1.04	1.25	1.64	2.20
Режим однократной дисперсии	6%	9%	11%	14%
Режим кросс-дисперсии	1%	1.5%	2%	2%

способности спектрографа. FWHM линий в спектре, полученном с наиболее узкой 0.9'' щелью, составляет около 4 пикселей. Она определяется шириной изображения щели, в проекции на приемник составляющей 3.3 пикселя, и абберациями оптической системы. В табл. 1 представлены оценки спектральной разрешающей силы. Эти оценки хорошо совпадают с теоретическими оценками, приведенными в работе Наджипа и др. (2017).

Профиль щели

Как было отмечено выше, в состав спектрографа входит калибровочный блок. Однако штатный калибровочный осветитель щели не обеспечивает равномерной засветки входной щели спектрографа (рис. 4). Поэтому профиль щели определялся нами по наблюдениям эмиссионных линий неба, полученных с высоким отношением сигнал/шум. Оказалось, что в целом форма полученных профилей практически не зависит от спектрального диапазона и ширины щели, а обусловлена виньетированием в оптической системе камеры. На индивидуальных профилях узких щелей присутствуют отдельные понижения пропускания на 5–10%, связанные, по-видимому, с неравномерной шириной щели. Результирующий сглаженный профиль щели 0.9'' изображен на рис. 4.

Эффективность при работе в спектральном режиме

Световая эффективность ASTRONIRCAM при работе в спектральном режиме оценивалась по наблюдениям спектров звезд спектрального класса A0V, используемых в качестве теллурических стандартов. При этом устанавливалась наиболее широкая щель (7.2''), позволяющая полностью захватить весь поток излучения от наблюдаемой звезды. Используемые нуль-пункты приведены в статье Токунаги и Вакки (2005). При вычислениях считалось, что пропускание атмосферы в зените равно 0.95 (см. Ломбарди и др., 2011, для $PVW = 4-7$ мм), доля площади главного зеркала, экранированная вторичным — 0.16, коэффициенты отражения каждого из трех зеркал телескопа в ИК-диапазоне — 0.9. Результаты расчетов приведены в табл. 2. На рис. 5 приведены соответствующие кривые зависимости световой эффективности от длины волны (без коррекции атмосферных полос поглощения) для каждого из рабочих диапазонов спектрографа.

Эффективность камеры в фотометрическом режиме была оценена Наджипом и др. (2017). В полосах *JHK* она достигает 60%. Принимая во внимание, что при работе с длинной щелью в

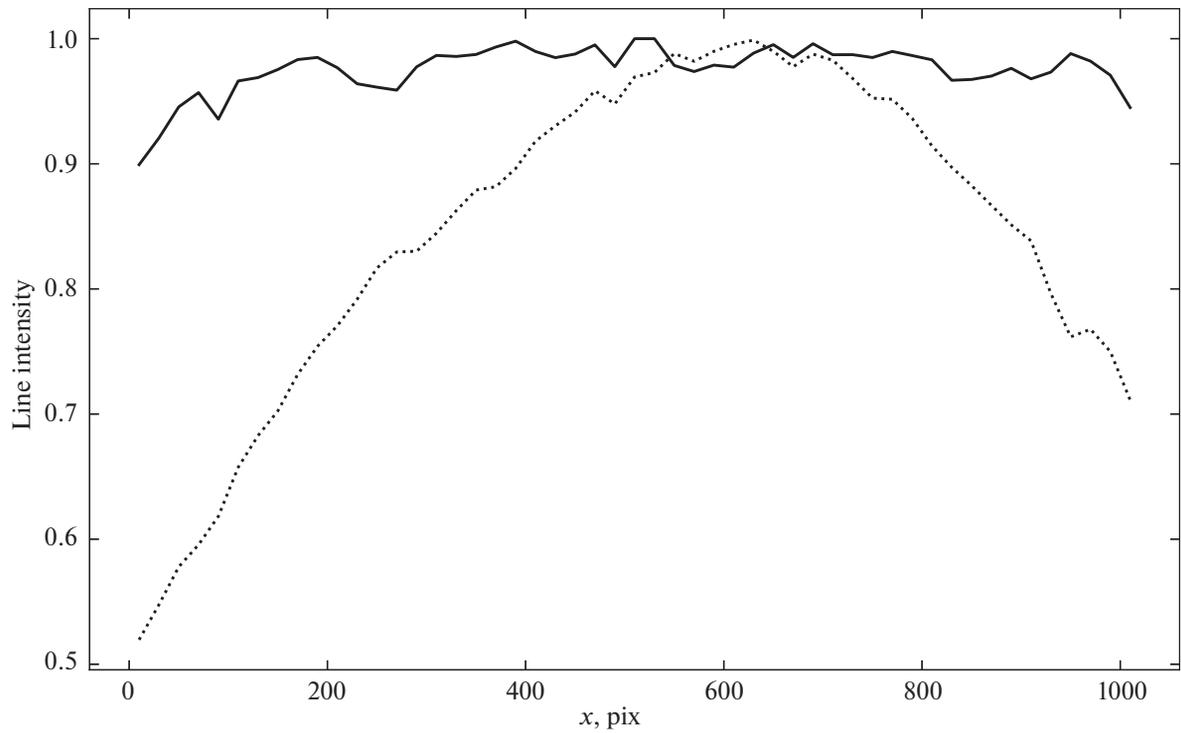


Рис. 4. Сглаженные профили щели $0''.9$, построенные с использованием штатного осветителя (пунктирная линия) и по линиям неба (сплошная линия).

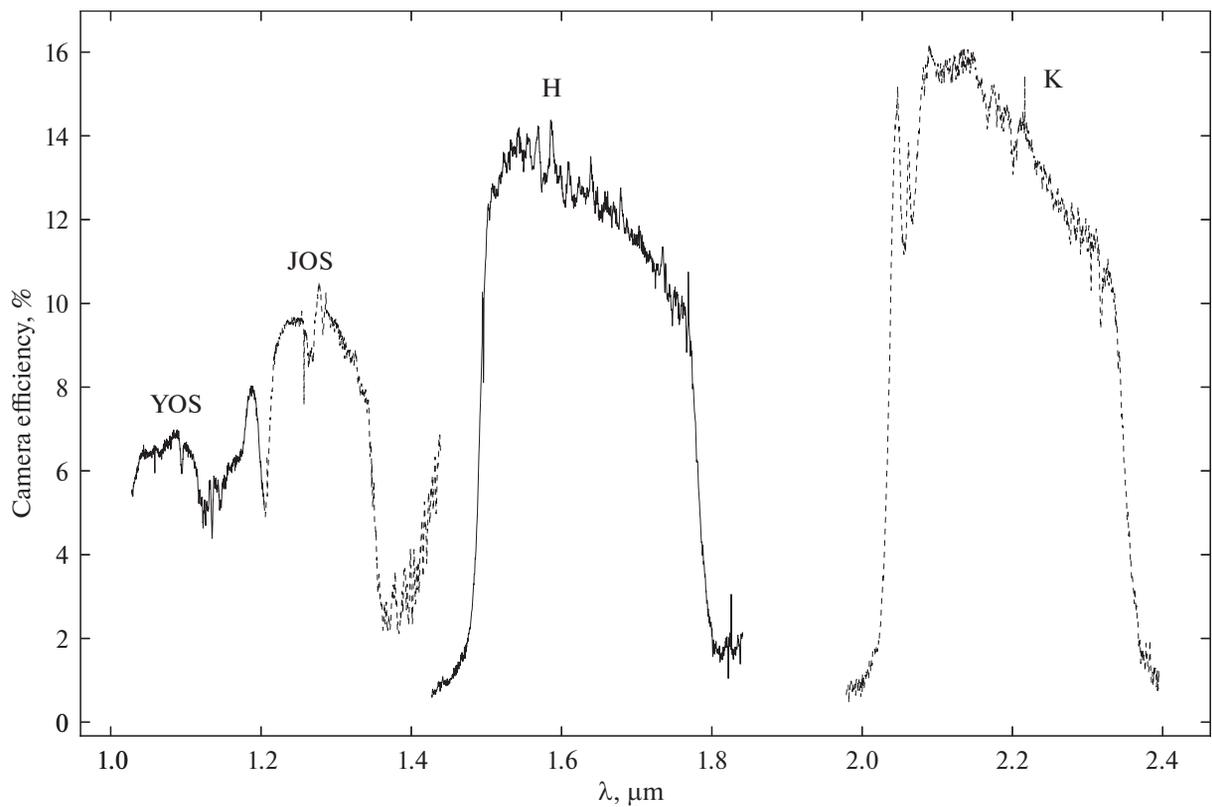


Рис. 5. Световая эффективность спектрографа в диапазонах Y , J , H и K (без коррекции атмосферных полос поглощения).

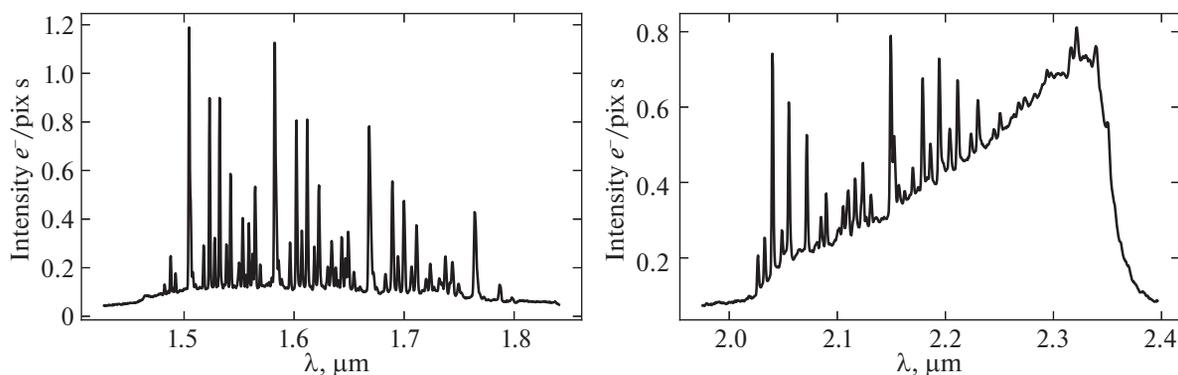


Рис. 6. Спектры неба в диапазонах *H* и *K* при температуре воздуха 17°C и воздушной массе 1.5.

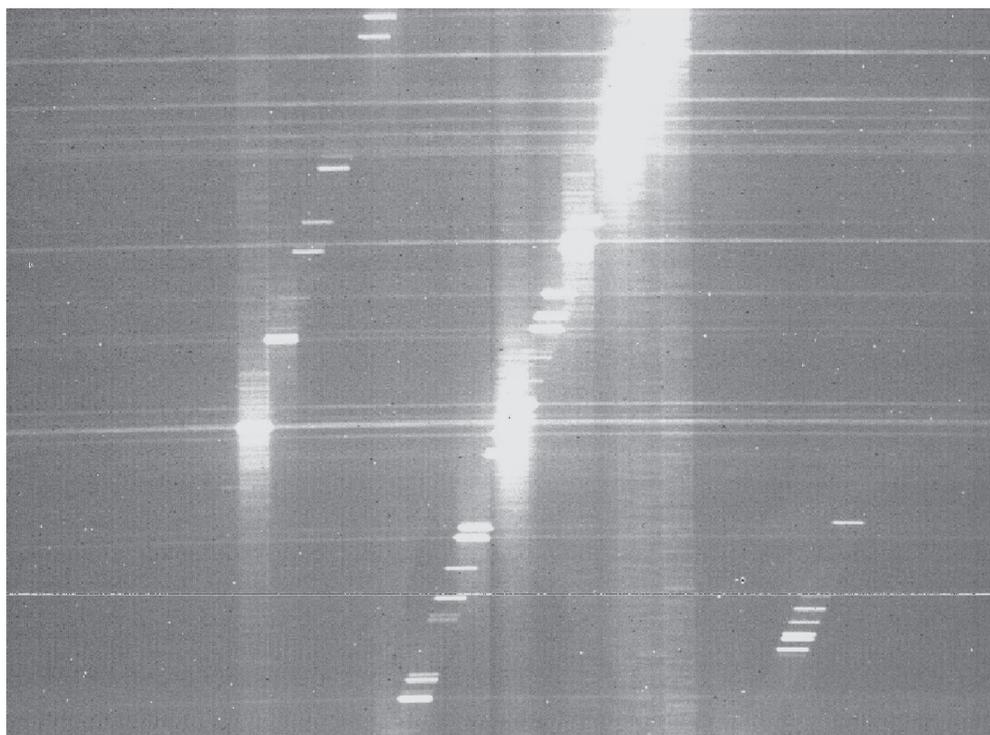


Рис. 7. Фрагмент спектра калибровочной лампы, полученного в режиме кросс-дисперсии в полосах *Y* и *J*.

качестве сортирующих порядки фильтров используются в том числе и фотометрические фильтры *H* и *K*, низкие значения эффективности камеры в спектрофотометрическом режиме говорят о низкой эффективности призмы для рабочих порядков и высоком уровне светорассеяния на них.

Кроме световой эффективности, на производительность и качество выходных данных оказывает влияние также величина фона. Она складывается из теплового излучения атмосферы и телескопа и свечения верхних слоев атмосферы.

На рис. 6 приведены примеры спектров неба, полученных с длинной щелью в полосах *H* и *K*. Они получены в июле 2018 г. на высоте 43° над горизонтом при температуре воздуха в приземном

слое 17°C. Видно, что в полосе *H* преобладает излучение в линиях гидроксила, которое присутствует и в коротковолновой части полосы *K*. Тепловое излучение атмосферы и (прежде всего) телескопа преобладает в длинноволновой части полосы *K*. В полосах *Y* и *J* сигнал от фона в элементе изображения при этом не превышает 0.1–0.2 e^-/s . Такой уровень фонового сигнала во всех рабочих спектральных диапазонах позволяет использовать экспозиции длительностью до 5 ч. Таким образом, величина фона не является ограничивающим фактором при спектральных наблюдениях с ASTRONIRCAM.

Используя полученные данные об эффективности прибора, можно рассчитать соотношение

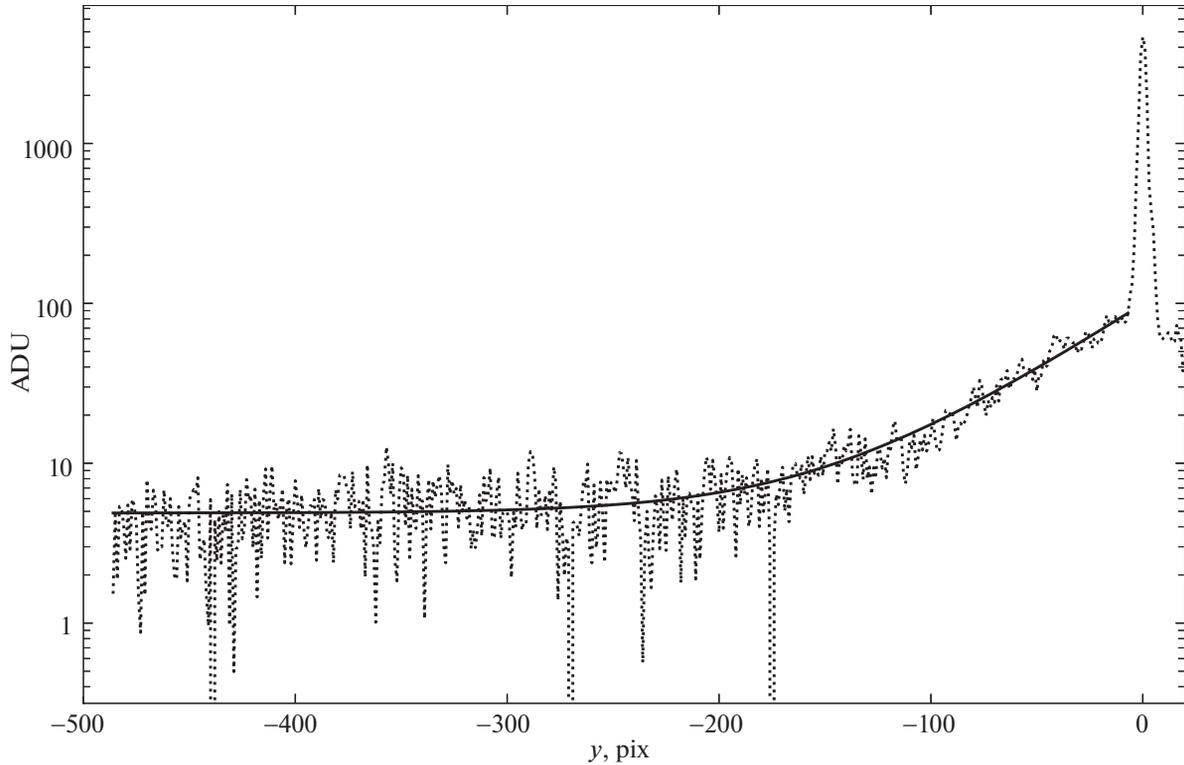


Рис. 8. Зависимость интенсивности рассеянного света от расстояния до спектральной линии для основной гризмы (пунктирная линия) и аппроксимация рассеянного света экспонентой с характерным масштабом 50 \AA (сплошная линия).

сигнал—шум при наблюдениях слабых объектов:

$$SNR = \frac{\eta Ft}{\sqrt{\eta Ft + \frac{RN^2}{N_{NDR}} N_{pix} + \eta F_{sky} t N_{pix}}},$$

где F — количество фотонов от звезды в диапазоне длин волн, соответствующему одному пикселу детектора, η — световая эффективность камеры, F_{sky} — количество фотонов от неба, приходящих на один пиксел, N_{pix} и N_{NDR} — протяженность изображения звезды вдоль щели в пикселах и количество неразрушающих считываний соответственно, RN — шум считывания в электронах, t — время экспозиции. Шум считывания убывает обратно пропорционально квадратному корню от количества считываний. Однако в нашем случае влияние шума считывания невелико и пуассоновские шумы неба и источника вносят гораздо больший вклад в величину SNR.

Расчеты показывают, что в полосе J прибор позволяет получить спектры звезд 16^m с $SNR = 10$ за время около 15 мин в режиме длинной щели, и примерно за 1 ч в режиме кросс-дисперсии.

РАССЕЯННЫЙ СВЕТ

Используемые диспергирующие элементы оптической системы камеры вносят искажения в получаемый спектр в виде «дúхов» и рассеянного

света. На рис. 7 приведен спектр аргонной лампы в диапазонах Y и J . На нем хорошо виден как свет, рассеянный основной гризмой — вертикальные полосы, расходящиеся от каждой линии в спектре вдоль направления дисперсии, так и свет, рассеянный гризмой кросс-дисперсии — узкие горизонтальные полосы. На рис. 8 приведена зависимость интенсивности рассеянного света от расстояния до линии для основной гризмы, а также аппроксимация этой зависимости экспоненциальной функцией. Интегрирование полученной функции позволяет оценить суммарную интенсивность рассеянного света, которая составляет около 75% от наблюдаемой интенсивности в линии, а интенсивность света, рассеянного гризмой кросс-дисперсии, составляет около 40%.

Учет рассеянного света позволяет количественно объяснить уровень фона, обнаруженный в спектрах аргонной лампы. На рис. 9 показаны реальный спектр лампы и модельный спектр, построенный с учетом рассеянного света в диапазонах Y и J . Видно хорошее совпадение модельного и наблюдаемого спектров, кроме границ спектральных диапазонов, где присутствует пересечение спектральных порядков.

Еще один фактор, искажающий наблюдаемое распределение в спектре, — так называемые дúхи дифракционной решетки (рис. 10а). Фурье-анализ

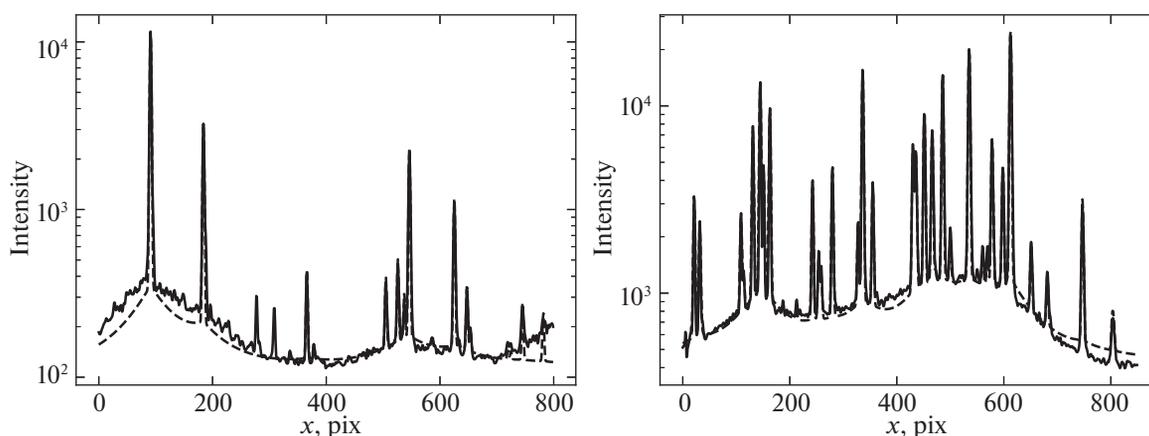


Рис. 9. Наблюдаемый (сплошная линия) и модельный (пунктирная линия) спектр аргоновой лампы.

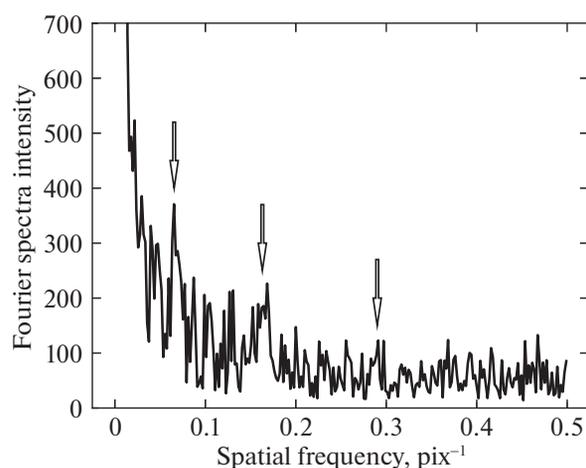
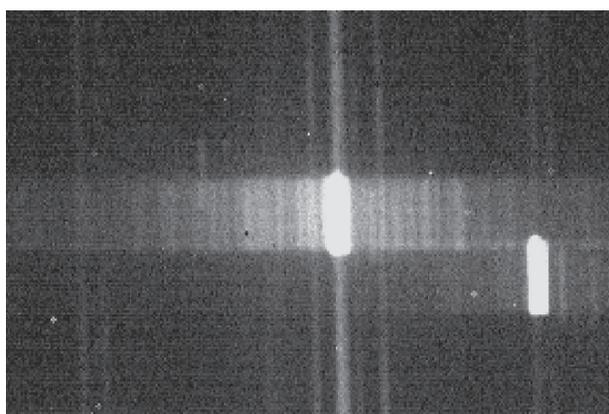


Рис. 10. “Духи” в рассеянном свете дисперсора: фрагмент изображения спектра с яркой линией (слева) и фурье-спектр рассеянного света (справа).

близкой к линии части рассеянного показал наличие повторяющихся “духов” с периодом примерно 46, 22 и 14 пикселей. Зная период основной решетки (81 штрих на мм), можно оценить периоды решетки дефектов, которые составляют соответственно около 5, 2.5, 1.6 “штрихов” на мм, или 1/130, 1/60 и 1/40 дюйма. Заметим, что при визуальном исследовании изображения “духов” наиболее выделяется период в 14 пикселей.

МЕХАНИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

Щелевые спектрографы низкого разрешения, позиционный угол которых изменяется при помощи механических деротаторов при установке в фокусах Кассегрена или Несмита, меняют пространственную ориентацию во время экспозиций и между ними. Поэтому важно знать, на сколько изменяются положения спектральных линий при повороте прибора, происходит ли это систематически и

однозначно в зависимости от угла или температуры прибора и/или окружающей среды. Это напрямую связано с надежностью определения доплеровских сдвигов (лучевых скоростей) по линиям спектра и накладывает определенные ограничения на частоту калибровок по длине волны и предельную продолжительность экспозиции.

С целью исследования механической стабильности спектрографа ASTRONIRCAM была проведена серия измерений сдвига по кадру эмиссионных линий в спектре калибровочной лампы спектрографа в зависимости от времени, угла наклона деротатора, а также температуры криостата. При этом использовались наиболее узкая короткая щель $0.9'' \times 10''$ и кросс-дисперсионная гризма диапазона YJ . Сдвиг спектра в направлении дисперсии определялся путем проведения кросс-корреляции текущего спектра с первым спектром в серии. Шум измерений взаимного

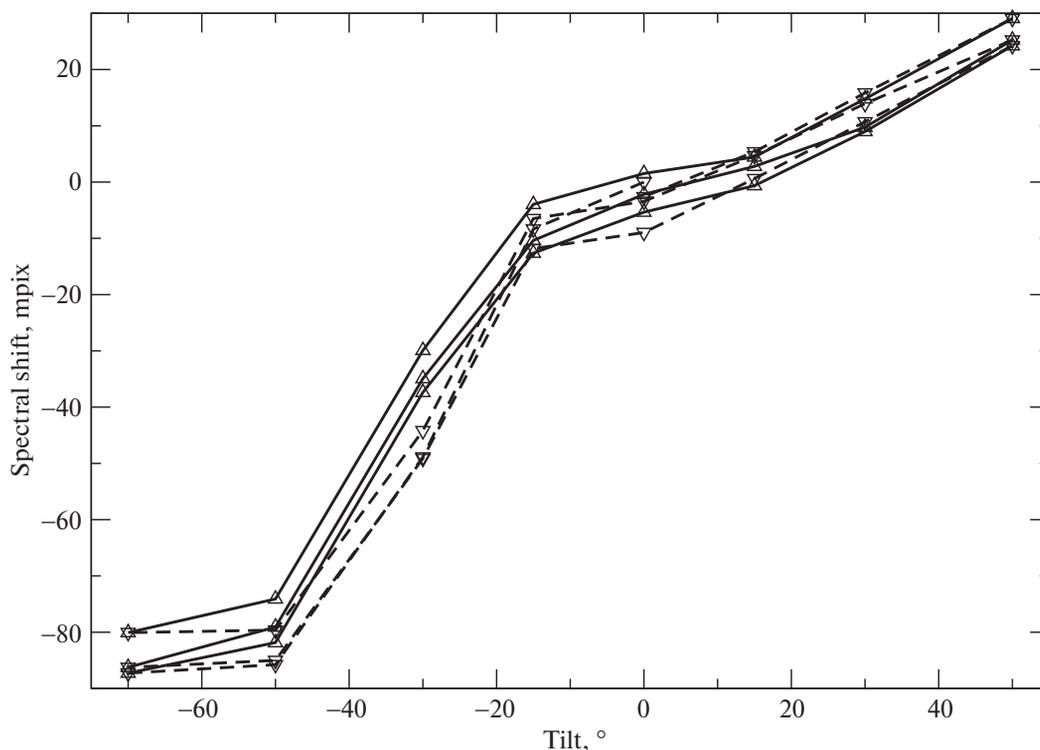


Рис. 11. Зависимость смещения спектра на детекторе от угла поворота деротатора в семи последовательных тестах с вращением по часовой стрелке (сплошные линии) и против (штриховые линии).

сдвига спектров используемым методом составляет менее 0.001 пикселя.

Измерения смещений спектра, вызванных изменением ориентации прибора, были проведены несколько раз с разными углами поворота. Оказалось, что при резком изменении угла деротатора на $\pm 30^\circ$ (например, при наведении на объект) спектр смещается на величину 0.04–0.06 пикселя (рис. 11). При максимально используемых во время наблюдений изменениях угла поворота деротатора в 120° отмечается смещение спектра на 0.1 пикселя. В новом положении наблюдается постепенное изменение положения спектра — дрейф, очевидно связанный с постепенным “провисанием” (“усадкой”) оптической схемы спектрографа. Величина дрейфа порядка 0.01 пикселя с характерным временем в несколько минут. Заметен также и относительно небольшой (порядка 0.01 пикселя) гистерезис в смещении спектра при смене направления вращения криостата. При медленном вращении деротатора, например, в процессе отслеживания суточного движения объекта, “усадки” оптической схемы спектрографа после остановки не наблюдается.

Температурный дрейф положения спектральных линий оценивается величиной 0.07 пикселя/К. При

этом изменение температуры внутренней (охлаждаемой) части спектрографа, связанное с испарением жидкого азота в первые сутки после стабилизации температуры после дозаправки, составляет менее 0.01 К/ч. Таким образом, при ежедневной заправке криостата влиянием изменения температуры спектрографа на положение спектра можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектральный режим камеры ASTRONIRCAM позволяет получать спектры астрономических объектов с длинными (около $280''$) и короткими (около $10''$) щелями шириной от $0.9''$ до $7''$ в спектральном диапазоне от 1 до 2.5 мкм. Для решения задачи первичной редукиции данных, получаемых в спектральном режиме ИК-камеры ASTRONIRCAM, был создан комплекс программ на языке python. Комплекс включает в себя модули учета плохих пикселей, коррекции за нелинейность детектора (с исправлением переполнения емкости ячейки во время накопления), коррекции геометрических искажений получаемого спектра, учета “плоского поля” и создания дисперсионной кривой.

По спектрам калибровочной аргоновой лампы сделана оценка разрешающей силы спектрографа

(табл. 1). Сравнение этой величины с полученными Наджипом и др. (2017) теоретическими оценками величины R для режима однократной дисперсии говорит о том, что для широких щелей ($1.8''$ и более), для которых можно пренебречь дифракцией, оптическая схема спектрографа строит изображение, близкое к расчетному. Для узких щелей реальное разрешение оказалось на 10–30% хуже расчетного. Общий профиль щели определяется виньетированием оптическими элементами спектрографа. При этом на краю щели пропускание системы падает менее, чем на 10%.

Изменение ориентации прибора во время наблюдений вызывает гнутие в его конструкции и смещение спектра относительно приемника. Характерная величина смещения, однако, составляет не более 0.002 пиксела/ $^\circ$. Поворот деротатора за время экспозиции на 30 градусов приводит к фиктивным доплер-сдвигам менее 2 км/с, которые можно учесть повторной калибровкой.

Эффективность спектрографа при работе с длинной щелью составляет от 6% в полосе Y , до 14% в полосе K (табл. 2). Сравнение с высокой эффективностью фотометрического режима ($\sim 60\%$, см. Наджип и др., 2017) говорит о том, что главный вклад в падение эффективности в спектральном режиме вносит основная гризма. Доля света, направляемого в рабочие порядки, составляет менее 35%. В крылья линий с характерным размером около 50 \AA при этом рассеивается около 40% наблюдаемого потока. Гризмы кросс-дисперсии еще в несколько раз снижают эффективность спектрографа — до 1–2% в полосах от Y до K .

Несмотря на ряд недостатков, наблюдения с ASTRONIRCAM в спектральном режиме ведутся с 2017 г. Основными объектами наблюдений выступали такие яркие объекты, как спутники Юпитера (Бусарев и др., 2018), симбиотические звезды, Post-AGB звезды и мириды.

С.Г. Желтоухов и Н.И. Шатский благодарят Российский Научный Фонд (грант № 17-12-01241) за частичную финансовую поддержку настоящей работы (разработка и реализация алгоритма коррекции спектральных данных и анализ результатов). Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусарев В.В., Татарников А.М., Бурлак М.А., *Астрон. вестник* **52**, 305 (2018) [V.V. Busarev, A.M. Tatarnikov, M.A. Burlak, *Solar System Res.* **52**, 301 (2018)].
2. Вакка и др. (W.D. Vacca, M.C. Cushing, and J.T. Rayner), *Publ. Astron. Soc. Pasific* **115**, 389 (2003).
3. Лич и Лоу (R.W. Leach and F.J. Low) *Proc. of SPIE* **4008**, 337 (2000)
4. Ломбарди и др. (G. Lombardi, E. Mason, C. Lidman, A.O. Jaunsen, and A. Smette), *Astron. Astrophys.* **528**, A43 (2011).
5. Масленникова и др. (N.A. Maslennikova, A.M. Tatarnikov, and N.I. Shatsky), in press (2020).
6. Наджип А.Э., Татарников А.М., Туми Д. и др., *Астрофиз. бюлл.* **72**, 382 (2017) [A.E. Nadjip, A.M. Tatarnikov, D.W. Toomey, et al., *Astrophys. Bull.* **72**, 349 (2017)].
7. Рао и др. (K.N. Rao, C.J. Humphreys, and D.H. Rank), *Wavelength Standards in the Infrared* (Academ. Press, 1966).
8. Садовничий В.А., Черепашук А.М., *Природа* **3**, 3 (2015).
9. Токунага, Вакка (A.T. Tokunaga and W.D. Vacca), *Publ. Astron. Soc. Pasific* **117**, 421 (2005).
10. Чилингарян и др. (I. Chilingarian, Y. Beletsky, S. Moran, W. Brown, B. McLeod, and D. Fabricant), *Publ. Astron. Soc. Pasific* **127**, 406 (2015).