

## Учет фона неба при спектральных инфракрасных наблюдениях протяженных объектов на Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ

А.С. Гусев,<sup>1,\*</sup> А.М. Татарников,<sup>1,2</sup> С.Г. Желтоухов,<sup>1</sup> М.С. Кирсанова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова  
Россия, 119234, Москва, Университетский пр-т, д. 13

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>3</sup>Институт астрономии РАН  
Россия, 119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 48

(Поступила в редакцию 16.02.2026; после доработки 06.04.2026; подписана в печать 08.04.2026)

Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ — единственная в России и одна из немногих в мире, где возможно получение спектральных данных в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне на  $\lambda = 1\text{--}2.5$  мкм. При этом существует проблема обработки спектров протяженных объектов, угловые размеры которых превосходят длину щели ( $4.5'$ ). Получение дополнительных спектров неба в непосредственной близости от таких объектов не решает проблему, поскольку яркие атмосферные линии гидроксила на  $\lambda \sim 2$  мкм существенно меняют свою интенсивность за время, меньшее времени экспозиции одного кадра. Нами разработана методика, позволяющая корректно учесть и исключить вклад переменных атмосферных линий в спектрах протяженных объектов. Данная методика успешно апробирована при спектроскопических исследованиях области звездообразования NGC 7538 (S158) в нашей Галактике.

PACS: 95.85.Jq, 95.75.Fg, 95.75.Mn УДК: 520

Ключевые слова: инфракрасная астрономия, спектроскопия, фон неба.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2620802](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2620802)

### ВВЕДЕНИЕ

Астрономический учебно-научный комплекс «Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ» (КГО [1]) является наиболее современной астрономической обсерваторией России, позволяющий вести фотометрические, спектральные и спеклополяриметрические наблюдения в оптическом и ИК-диапазонах. Флагман обсерватории — 2.5-метровый телескоп системы Ричи–Кретьена — оснащен уникальной в России и одной из немногих в мире инфракрасной камерой-спектрографом AstroNIRCam [2], позволяющей вести как фотометрические и спектрофотометрические [3], так и спектроскопические наблюдения [4] в диапазоне от 1.04 до 2.45 мкм.

Несмотря на то, что получаемые на КГО ИК-данные несколько уступают по качеству результатам, получаемым на специализированных ИК телескопах и прежде всего космическому телескопу им. Джеймса Вебба (JWST) [5, 6], коллективу ГАИШ удается получать уникальные данные в области звездной астрофизики, внегалактической астрономии, физики межзвездной среды, тел Солнечной системы. Особенностью ИК-камеры, установленной на КГО, является достаточно большое поле

зрения относительно JWST, MUSE и ряда других телескопов, позволяющее получать изображения и спектры протяженных (диаметром несколько угловых минут) объектов. Одной из самых сложных проблем при обработке ИК спектроскопических наблюдений является исправление спектрограмм за фон неба. На длинах волн порядка 2 мкм излучают очень яркие атмосферные линии гидроксила (см., например, рис. 6 в работе [4]). Если для точечных или небольших по угловым размерам источников (до  $3'$ ) фон неба можно определить непосредственно из спектрограммы объекта, то для протяженных источников, таких как туманности и галактики с угловыми размерами более  $3\text{--}4'$ , приходится снимать дополнительные спектры неба в непосредственной близости от объекта исследования. К сожалению, атмосферные линии гидроксила существенно меняют свою интенсивность за время, меньшее времени экспозиции и считывания одного кадра (порядка 10 мин; см. раздел 2). Это является следствием того, что КГО расположена в месте с не самым хорошим астроклиматом для проведения ИК-наблюдений: медианное значение содержания водяного пара в атмосфере (PWV) составляет 7.7 мм [7] и подвержено быстрым изменениям (наземные обсерватории в Чили и на Гавайях, где установлены специализированные ИК-телескопы, имеют  $\text{PWV} < 2$  мм).

Начатый нами обзор областей образования массивных звезд в оптическом, инфракрасном и миллиметровом диапазонах (OPTIMus) [8] включает

\* E-mail: [gusev@sai.msu.ru](mailto:gusev@sai.msu.ru)

в себя, в том числе, проведение спектральных ИК-наблюдений. Объекты исследования — области современного звездообразования в Галактике — являются природными физико-химическими лабораториями, где наблюдается большое разнообразие состояний ионизации вещества, физических условий и скоростей. Эти области имеют угловые размеры, достигающие десятков угловых минут дуги, а особо интересующие нас эмиссионные линии переходов  $H_2$  в этих областях — во много раз слабее атмосферных гидроксильных линий, многие из них лежат на пиках или крыльях атмосферных линий. Это потребовало разработки особой методики определения, учета и вычитания спектра фона неба.

В качестве образца мы использовали спектры области NGC 7538 (S158), полученные с длинной щелью. Данная область с ионизирующей звездой спектрального класса O5-O6 V (источник IRS6) расположена на расстоянии 2.8 кпк и имеет угловой диаметр порядка  $10'$  [9]. Ранее, на основе наблюдений, полученных в КГО, нами уже были проведены ИК фотометрические исследования области NGC 7538 в полосе  $H$  и узкополосных фильтрах, центрированных на линии  $Br\gamma$  ( $\lambda = 2.17$  мкм),  $H_2$  (2.12 мкм) и  $[Fe II]$  (1.64 мкм) [10].

## 1. НАБЛЮДЕНИЯ

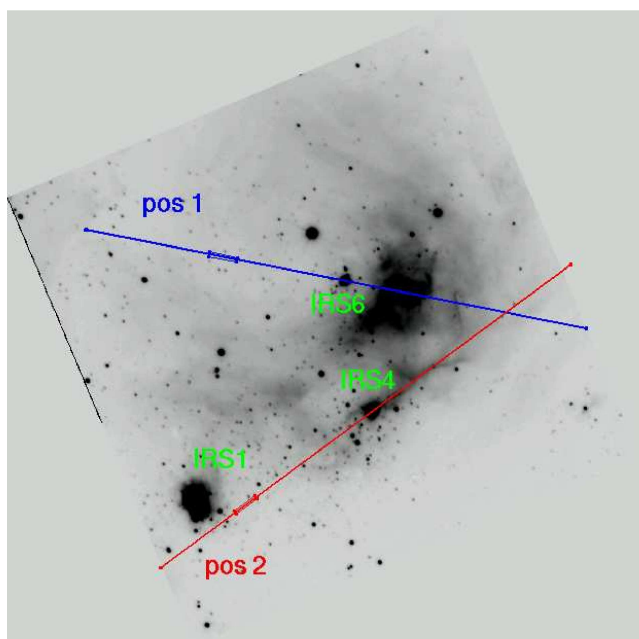


Рис. 1. Изображение NGC 7538 в линии  $Br\gamma$  из работы [10] с нанесенными положениями щелей 1 и 2 (pos 1 и 2). Жирными отрезками ограничены области, в которых проводился анализ изменений яркости линий и континуума в разделе 2 и их коррекция в разделе 3. Размер изображения в  $Br\gamma$  —  $5.9' \times 5.9'$ , длина щелей —  $268''$ . Север — сверху, восток — слева

с длинной щелью проводились авторами 15 февраля 2022 г. (положение щели 1, центрированное на источник IRS6, позиционный угол  $78.8^\circ$ ) и 26 сентября 2022 г. (положение щели 2, центрированное на источник IRS4, позиционный угол  $126.5^\circ$ ; рис. 1). Непосредственно после наблюдений объекта, с тем же положением щели и той же экспозицией снималась площадка фона в непосредственной близости от NGC 7538. Качество изображения при наблюдениях в положении щели 1 составило  $2.3''$ , в положении щели 2 —  $1.4''$ .

Приемником камеры AstroNIRCam является матрица HAWAII-2RG формата  $2048 \times 2048$  с размером пикселя 18 мкм, что соответствует  $0.27''$ . В спектральном режиме используется лишь часть поверхности детектора. Размеры щели —  $268'' \times 0.9''$ . При данной ширине щели достигается спектральная разрешающая сила  $R = 1200$ . Для выделения спектрального диапазона длин волн и соответствующего порядка дисперсии гризмы использовался светофильтр  $K$  из набора стандартных широкополосных фильтров. Это позволило получить спектры в диапазоне 2.04–2.35 мкм с дисперсией  $4.6 \text{ \AA}/\text{пиксель}$ .

При наблюдениях 15 февраля 2022 г. были получены четыре спектрограммы NGC 7538 (одна — с интегральным временем экспозиции 292.9 с и три — с экспозицией 596.7 с, обозначаемые далее obj 1–4) и две спектрограммы фона неба (с экспозицией 596.7 с каждая; sky 1-2). 26 сентября 2022 г. были получены три спектрограммы объекта (obj 1–3) и две — фона (sky 1–2), каждая — с экспозицией 592.9 с. Непосредственно после наблюдений фона неба были получены спектры звезд-стандартов (три спектрограммы HIP22590 в феврале с экспозицией 97.6 с каждая и три спектрограммы HIP117450 в сентябре с экспозицией 192.9 с каждая), снятые на близких воздушных массах. Первичная обработка данных проводилась согласно стандартной методике, описанной в работе [4]. Выходными данными после обработки являются fits-файлы размером  $992 \times 900$  пикселей (рис. 2, 3).

## 2. ИЗМЕНЕНИЕ ЯРКОСТИ ЛИНИЙ НЕБА И УРОВНЯ КОНТИНУУМА СО ВРЕМЕНЕМ

Для измерения изменений яркости атмосферных линий и уровня континуума со временем мы использовали спектрограммы объекта и площадок фона. С этой целью выбирались наиболее «тусклые» области NGC 7538 вдоль щелей 1 и 2, в которых вклад эмиссионных линий объекта в спектр минимален (см. жирные отрезки на рис. 1 и вертикальные линии на рис. 2, 3). Для получения однородных данных были выбраны одинаковые участки щелей для спектрограмм объекта и фона (отдельно для положений щелей 1 и 2), а также исключен из анализа первый спектр NGC 7538 (obj 1) в положении щели 1, полученный с отличающейся экспозицией.

Для каждого пикселя поперек щели (по  $\lambda$ ; ось  $Y$

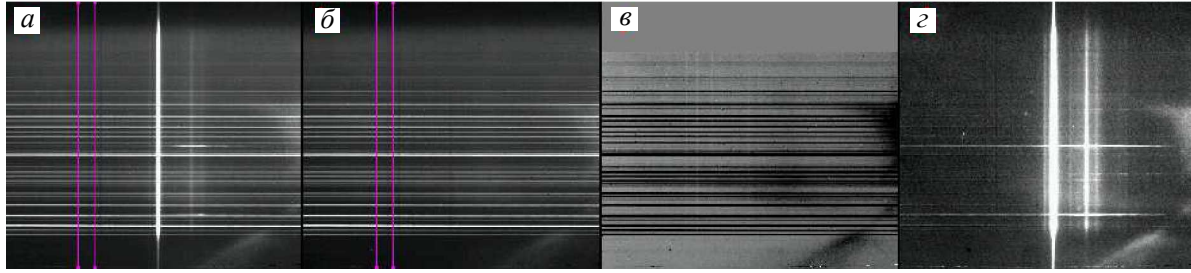


Рис. 2. Суммированные и нормированные на время экспозиции спектрограммы для щели 1 объекта (*a*) и площадки неба (*b*); разница между исправленной согласно методике, описанной в разделе 3, спектрограммой фона неба и неисправленной спектрограммой фона (*e*); спектрограмма объекта после вычитания за исправленную спектрограмму фона неба (*z*). Вертикальными линиями на изображениях (*a*, *b*) ограничена область, в которой проводился анализ изменений яркости линий и континуума в разделе 2 и их коррекция в разделе 3. Координаты вдоль щели расположены по горизонтали, длины волн — по вертикали

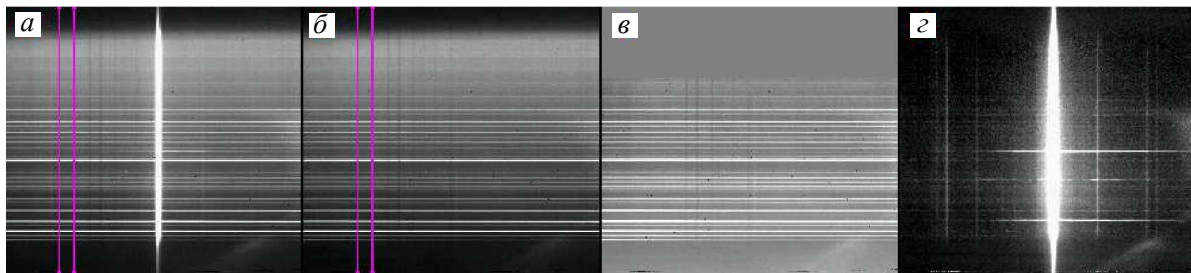


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для щели 2

на рис. 2, 3) были рассчитаны медианные потоки, нормированные на время экспозиции в секундах. Полученные спектры представлены на рис. 4.

Мы выбрали три яркие атмосферные линии (line 1-3) и три участка непрерывного спектра (cont 1-3) на различных  $\lambda$ , на которые не накладываются яркие эмиссионные линии объекта (рис. 4). Для линий гидроксила были измерены интегральные потоки и максимумы яркости профиля линий (с вычитанием континуума около линий), а для участков непрерывного спектра — их средние значения.

Аппроксимируя профили линий гидроксила гауссианами, мы обнаружили, что в течение сета наблюдений (2–3 ч) длины волн  $\lambda_0$  на пиксельной сетке и ширины на половине интенсивности (FWHM)  $\sigma$  линий неба остаются, как правило, стабильными: относительные вариации  $\Delta\lambda_0/\sigma$  для трех линий неба, показанных на рис. 4, не превышают 2.5% (0.5Å или 0.1 пикселей в абсолютных единицах) для обоих сетов, а величина  $\Delta\sigma/\sigma$  не превосходит 2.5% (0.5Å или 0.1 пикселей) при характерном  $\sigma \sim 4$  пикселя (16–20Å). Возможные исключения рассмотрены в разделе 3.

Учитывая стабильность параметров линий гидроксила, интегральные потоки в линиях нами не рассматривались, поскольку для нашей задачи важны временные изменения профиля линий вдоль пиксельной сетки (т.е. для каждого значения  $\lambda$ ).

На рис. 4 показаны полученные спектры для трех экспозиций в каждом положении щели. Как видно из рисунка, линии неба значительно меняют свою

яркость от спектра к спектру. Изменение максимальной интенсивности самой яркой линии гидроксила (line 1) за время наблюдений ( $\approx 50$  мин, см. рис. 5) достигает 0.15–0.2 отсчетов в секунду, что соответствует относительным изменениям в 10–15%. Для сравнения, самая яркая линия в спектре туманности NGC 7538, Br $\gamma$  ( $\lambda = 2.1661$  мкм), не blendируется с атмосферными линиями и видна на спектрах в виде слабого пика на  $X \approx 415$  пикселей (см. разницу между спектрами объекта (obj) и неба (sky) на рис. 4).

Отношение интенсивностей (максимумов яркости) атмосферных линий остается при этом достаточно стабильным, меняясь в пределах  $\pm 1\%$  (см. нижний график на рис. 5).

Изменение уровня непрерывного спектра со временем в абсолютных единицах крайне мало, в пределах 2% (рис. 5). В относительных единицах вариации уровня континуума и его отношение на различных участках спектра примерно соответствуют изменениям максимальной яркости неба и их соотношениям. Единственным исключением является рост уровня континуума в длинноволновой области спектра при наблюдениях в положении щели 2 (см. правый график на рис. 5), причем уровень непрерывного спектра на спектрограммах площадки фона даже несколько выше уровня на спектрограммах объекта (см. область  $X \approx 700$  пикселей ( $\lambda \approx 2.30$  мкм) на нижнем графике рис. 4). Подобный случай: увеличение наклона непрерывного спектра — характерен для наблюдений, во время которых меняется температура телескопа. В част-

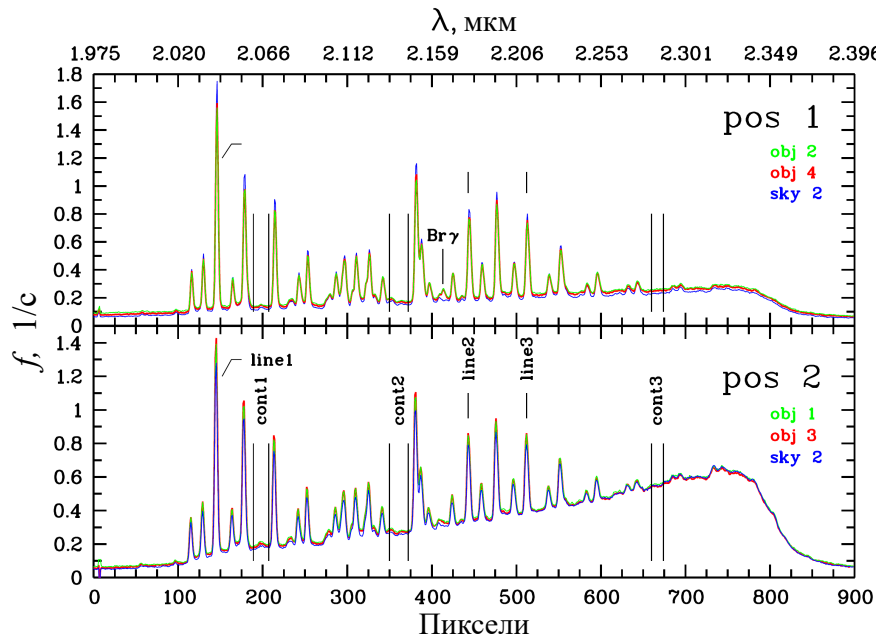


Рис. 4. Спектры объекта (второй и четвертый) и второй спектр фона неба в положении щели 1 (зеленая, красная и синяя кривые соответственно; верхний график) и спектры объекта (первый и третий) и второй спектр фона неба в положении щели 2 (зеленая, красная и синяя кривые, соответственно; нижний график) в площадке, показанной на рис. 1–3. Разница между снимками —  $\sim 20$  мин. Стрелками показаны линии гидроксила 2.0413 (line 1), 2.1802 (line 2) и 2.2126 мкм (line 3); горизонтальными линиями показаны области континуума на  $\lambda \sim 2.06$  мкм ( $\sim 200$  пикселей; cont 1),  $\lambda \sim 2.14$  мкм ( $\sim 370$  пикселей; cont 2) и  $\lambda \sim 2.29$  мкм ( $\sim 670$  пикселей; cont 3), анализируемые на рис. 5

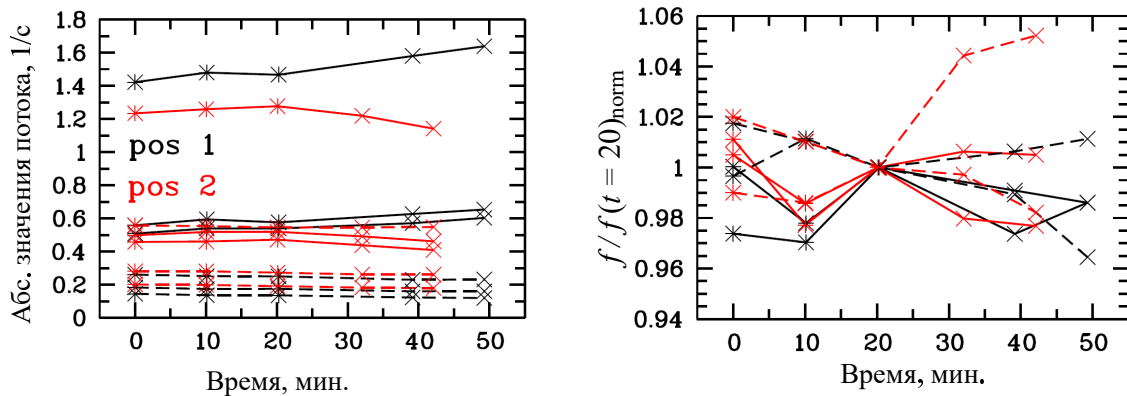


Рис. 5. Изменение максимальных уровней яркости линий неба 1–3  $f_{\text{line}}^{\text{max}}$  (непрерывные линии) и средних значений уровня континуума в областях спектра 1–3  $f_{\text{cont}}$  (штриховые линии) со временем для наблюдений с положением щели 1 (черный цвет) и 2 (красный цвет). Звездочками обозначены значения для спектров объекта, косыми крестиками — для спектров неба. На левом графике приведены абсолютные значения потока, на правом — отношения  $f_{\text{line}}^{\text{max}}/f_{\text{line}}^{\text{max}}$ ,  $f_{\text{line}}^{\text{max}}/f_{\text{line}}^{\text{max}}$ ,  $f_{\text{cont}}/f_{\text{cont}}$  и  $f_{\text{cont}}/f_{\text{cont}}$ , нормированные на соответствующие отношения потоков для последней экспозиции объекта, соответствующей времени  $\approx 20$  мин. Время  $t = 0$  соответствует записи файла первой экспозиции (obj 2 для щели 1 и obj 1 для щели 2)

ности, за время наблюдений в положении щели 2 объекта и фона неба температура трубы и зеркала телескопа возросла на  $0.2^\circ\text{C}$ .

Отметим, что, в отличие от изменений яркости атмосферных линий, вариации непрерывного спектра не влияют на нашу основную цель — измерение интенсивности эмиссионных линий объекта. В рамках проекта OPTIMUS изучаются свойства газо-пылевой среды областей образования

массивных звезд. Уровень континуума в спектрах «чистой» (без примеси звезд) межзвездной среды крайне мал; величины эквивалентных ширин эмиссионных линий в таких спектрах малоинформативны. Уровень континуума в спектрах звезд областей звездообразования, особенно в спектрах ярких источников (IRS4, IRS6 и др.), достаточно высок относительно вариаций непрерывного спектра в течение сета наблюдений и позволяет получать звезд-

ные спектры с высоким отношением сигнала к шуму (см. спектры звезд на левых и правых изображениях рис. 2, 3).

### 3. МЕТОДИКА ИСПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ ЗА АТМОСФЕРНЫЕ ЛИНИИ

В разделе 2 было показано, что интенсивности линий неба заметно меняются от кадра к кадру за время наблюдений, в то время как их отношение, а также уровень континуума варьируются крайне незначительно. Таким образом, для коррекции атмосферных линий гидроксила требуется определить отношение потоков в линиях на спектрограммах площадки фона и объекта. Для этого мы использовали те же участки вдоль щели на спектрограммах туманности и площадки фона, что и в предыдущем разделе (см. рис. 1–3). Принципиально важным моментом является выбор площадок, в которых отсутствуют звезды, вносящие значительный вклад в уровень непрерывного спектра. Для дополнительной проверки метода также были рассмотрены спектрограммы звезд-стандартов (star) на тех же участках вдоль щели, свободных от вклада излучения астрономических объектов в спектр. Вклад в спектр на этих участках вносит лишь излучение фона.

В отличие от раздела 2 здесь мы суммировали изображения спектра объекта, экспозиции спектра площадки фона, а также спектры площадок из спектрограмм звезд-стандартов для каждого положения щели. Далее, для каждого пикселя поперек щели определялись и нормировались на время экспозиции в секундах медианные потоки. Полученные суммарные спектры объектов и площадок фона (черные и голубые кривые соответственно) показаны на рис. 6.

Предварительно было рассмотрено соответствие длин волн  $\lambda_0$  на пиксельной сетке в спектрах объекта, фона неба и площадки из спектрограммы звезд-стандарта для каждого положения щели. Как было показано в разделе 2, отклонения величины  $\lambda_0$  не превышали 0.1 пикселя за исключением спектра звезд-стандарта для положения щели 1. Данная спектрограмма была смещена нами вдоль пиксельной сетки на 0.2 пикселя для совмещения со спектрограммой фона неба для щели 1. Амплитуды линий неба при смещении изменились в относительных единицах на  $\approx 2\%$  (0.02 отсчетов в секунду для наиболее ярких линий).

На первом этапе мы определяем уровень континуума для спектра фона неба. Учитывая, что на краях спектра линии гидроксила отсутствуют, а пропускание используемого в наблюдениях фильтра  $K$ , выделяющего спектральный диапазон длин волн, резко падает (см. рис. 1, 5 в [4]), величина непрерывного спектра определялась нами в диапазоне длин волн от  $\lambda = 2.01$  до  $2.34$  мкм ( $X = 75$  до  $775$  пикселей; рис. 6). В данной области уровень континуума можно считать линейно растущим с увеличением  $\lambda$  (т.е.  $X$ ). На краях спектра, вне

пределов области  $\lambda = 2.01 - 2.34$  мкм, чувствительность фильтра  $K$  резко падает, а атмосферные линии гидроксила отсутствуют. Полученные зависимости для уровня континуума показаны фиолетовыми прямыми на рис. 6.

На втором этапе непрерывный спектр  $f(\text{cont})$  вычитался из спектра фона неба  $f(\text{sky})$ . Параллельно мы вычли из спектров объекта и площадки звезд-стандарта спектр неба (без учета уровня континуума); полученная разность спектров  $f(\text{obj}) - f(\text{sky})$ ,  $f(\text{star}) - f(\text{sky})$  для каждого пикселя  $X$  показана на рис. 6, 7 зеленым цветом.

Дальнейший анализ проводился с помощью диаграмм  $(f(\text{star}) - f(\text{sky})) - (f(\text{sky}) - f(\text{cont}))$ ,  $(f(\text{obj}) - f(\text{sky})) - (f(\text{sky}) - f(\text{cont}))$  (рис. 8).

На графиках рис. 8 видно, что в ярких атмосферных линиях (для значений  $f(\text{sky}) - f(\text{cont}) > 0.1$  отсчетов в секунду) наблюдаются систематические изменения величины  $f(\text{star}) - f(\text{sky})$  и  $f(\text{obj}) - f(\text{sky})$ . Она падает с ростом  $f(\text{sky}) - f(\text{cont})$  в случае, когда линии гидроксила ярче на спектрограмме площадки фона, и растет в обратном случае. Линейность зависимости для  $f(\text{sky}) - f(\text{cont}) > 0.1$  отсчетов в секунду отражает тот факт, что их отношение не меняется при переходе от спектра фона неба к спектру объекта (площадки звезды-стандарта). При нулевых значениях  $f(\text{sky}) - f(\text{cont})$  разность  $f(\text{obj}) - f(\text{sky}) = 0.01 - 0.02$  отсчетов в секунду — это является следствием того, что уровень непрерывного спектра объекта систематически превышает уровень непрерывного спектра фона неба (см. спектры на рис. 4 и 6 для обеих щелей). Для спектра, полученного в положении щели 2, разница  $f(\text{obj}) - f(\text{sky})$  на малых  $f(\text{sky}) - f(\text{cont})$  варьируется в диапазоне  $-0.005 \div 0.025$  отсчетов в секунду. Причиной этого является разный наклон непрерывного спектра для объекта и фона неба; в длинноволновой части уровень континуума спектра площадки неба превышает уровень континуума спектра объекта. Это особенно наглядно видно на нижнем графике рис. 4 на  $\lambda > 2.30$  мкм ( $X > 700$  пикселей).

Разброс точек на диаграмме  $f(\text{star}) - f(\text{sky})$  для спектров площадок звезд-стандартов оказался заметно большим, чем на диаграмме  $f(\text{obj}) - f(\text{sky})$  для спектров объекта (рис. 8). Причиной этого является относительно малое время экспозиции спектров звезд-стандартов и, как следствие, меньшее отношение «сигнал-шум» для них. Отметим также ненулевую разность  $f(\text{star}) - f(\text{sky})$  при нулевых значениях  $f(\text{sky}) - f(\text{cont})$ , отражающую вариации уровня непрерывного спектра со временем.

На следующем этапе по точкам на диаграммах  $(f(\text{star}) - f(\text{sky})) - (f(\text{sky}) - f(\text{cont}))$  и  $(f(\text{obj}) - f(\text{sky})) - (f(\text{sky}) - f(\text{cont}))$  вычисляется линейная регрессия

$$f(\text{star/obj}) - f(\text{sky}) = \alpha(f(\text{sky}) - f(\text{cont})) + \beta. \quad (1)$$

Мы рассмотрели два варианта линейной аппроксимации: по всему облаку точек на диаграммах (исключая точки с  $f(\text{sky}) - f(\text{cont}) < 0.15$  отсчетов в секунду для спектров объекта; красные прямые

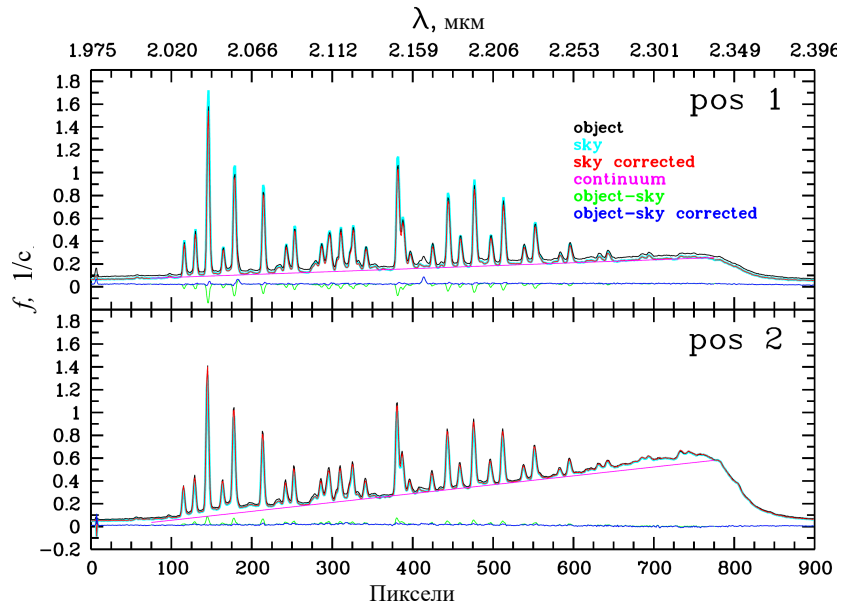


Рис. 6. Спектры объекта (черная кривая), фона неба (голубая), исправленного фона неба (красная), уровня континуума (фиолетовая прямая), разницы между спектром объекта и неба (зеленая кривая) и разницы между спектром объекта и исправленным фоном неба (синяя) для положения щели 1 (сверху) и 2 (снизу)

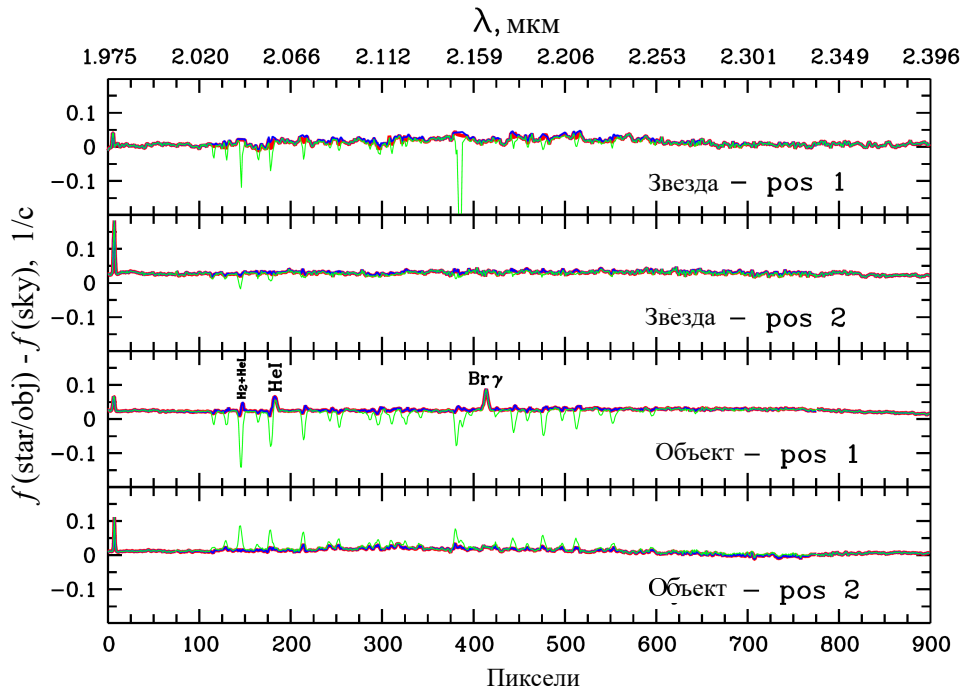


Рис. 7. Разница между спектром объекта (площадки звезды-стандарта) и неба (зеленые кривые), разница между спектром объекта (площадки звезды-стандарта) и фоном неба, исправленным согласно аппроксимации по нижней огибающей облака точек (синие кривые) и исправленным согласно аппроксимации по всему облаку точек (красные кривые) для положений щели 1 и 2

на рис. 8) и по нижней огибающей облака точек (синие прямые).

Вариант с линейной аппроксимацией по нижней огибающей облака точек проводился из-за того, что для спектра объекта более высокие значения  $f(\text{obj}) - f(\text{sky})$  для данного  $f(\text{sky}) - f(\text{cont})$  могут быть вызваны вкладом эмиссионных линий туманности.

Относительная погрешность линейной аппроксимации  $\Delta\alpha/|\alpha|$  составила 4 – 6%; при этом разница между коэффициентами регрессии, полученными по нижней огибающей облака точек и по всему облаку точек, лежит в пределах данной погрешности для обоих положений щелей. Исключение составила только зависимость для площадки

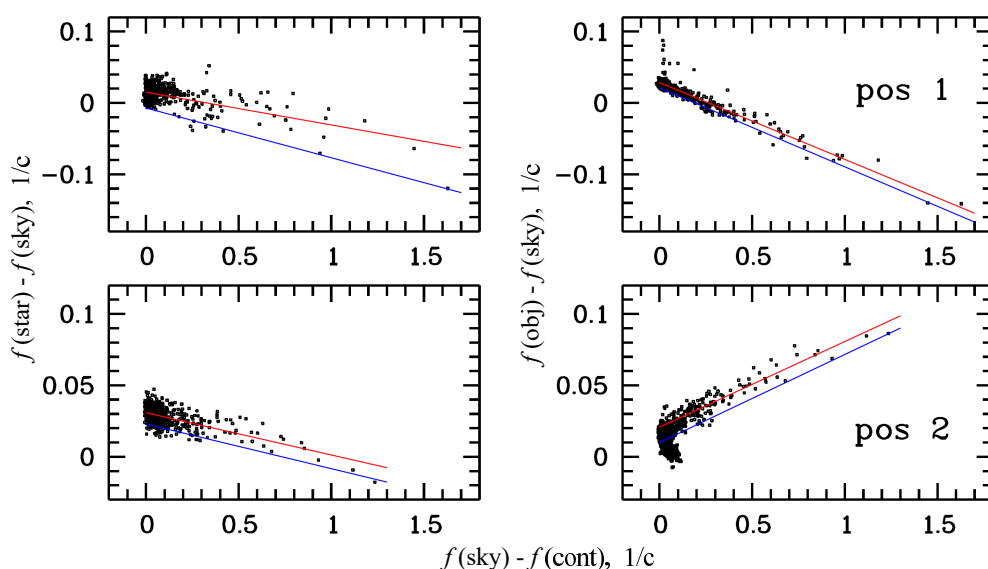


Рис. 8. Зависимость между разницей потоков для каждого пикселя (ось  $X$  на рис. 6, 7) в спектре площадки звезды-стандарта  $f(\text{star})$  (слева), объекта  $f(\text{obj})$  (справа) и площадки фона  $f(\text{sky})$  и потоком в спектре площадки фона неба после вычета континуума  $f(\text{cont})$  для наблюдений с положением щели 1 (сверху) и 2 (снизу). Красные и синие прямые — полученные оценки линейной регрессии (1) облака точек и по нижней огибающей облака точек соответственно

звезды-стандарта в положении щели 1 (см. левый верхний график на рис. 8).

Далее каждый пиксель двухмерной спектрограммы фона неба умножается на коэффициент  $\alpha + 1$ , к ней прибавляется непрерывный спектр:

$$f(\text{sky corr})(X, Y) = (\alpha + 1)f(\text{sky})(X, Y) + f(\text{cont})(Y). \quad (2)$$

Исправленная, согласно уравнению (2), спектрограмма фона неба  $f(\text{sky corr})$  вычитается из спектрограммы объекта  $f(\text{obj})$  или площадки звезды-стандарта  $f(\text{star})$ .

Разность между спектром объекта (площадки звезды-стандарта) и исправленным фоном неба для обоих положений щелей показана на рис. 7, где синяя кривая соответствует исправленному фону неба, согласно аппроксимации по нижней огибающей облака точек, а красная — по всему облаку точек. Как видно из рисунка, обе аппроксимации дают практически одинаковый результат и корректно исправляют спектр за линии неба (зеленая кривая). Профиль  $f(\text{star}) - f(\text{sky})$  на верхних графиках рис. 7 соответствует разнице между уровнями непрерывного спектра площадки звезды-стандарта и фона неба.

В общем случае для исправлений линий неба при наблюдениях протяженных объектов мы рекомендуем использовать аппроксимацию по нижней огибающей облака точек, проводя линейную регрессию по всему облаку точек для контроля.

Полученные спектрограммы туманности после вычитания за исправленную, согласно аппроксимации по нижней огибающей облака точек, спектрограмму фона неба показаны на изображениях

рис. 2, 2, 3, 2 для положений щелей 1 и 2, соответственно. На графиках рис. 6 исправленные спектры фона неба показаны красным цветом, а спектры объекта после вычитания спектра исправленного фона неба — синим.

Вне эмиссионных линий уровень континуума спектра  $f(\text{obj}) - f(\text{sky corr})$  совпадает с уровнем непрерывного спектра  $f(\text{obj}) - f(\text{sky})$  с точностью лучше 10% (ср. синие и зеленые кривые на рис. 6 и профили на рис. 7). Таким образом, нам удастся исправить спектр фона неба с корректным учетом уровня континуума.

Коррекция спектра фона неба проводится для центрального участка спектра. Для коротко- ( $\lambda < 2.01$  мкм;  $X < 75$ ) и длинноволновой ( $\lambda > 2.34$  мкм;  $X > 775$ ) областей из спектра объекта вычитается спектр фона неба без каких-либо исправлений.

Разница между исправленной ( $f(\text{sky corr})$ ) и исходной ( $f(\text{sky})$ ) спектрограммами фона неба представлена на изображениях рис. 2, в, 3, в для положений щелей 1 и 2 соответственно. Спектр участка туманности NGC 7538 после вычитания фона неба показан на рис. 6.

Сравнивая спектры объекта после вычитания исправленного и исходного спектра фона неба (синие и зеленые линии на рис. 6), можно отметить, что: 1) нам удалось исключить влияние ярких атмосферных линий гидроксила, 2) на фоне атмосферных линий нам удастся выделить слабые эмиссионные линии даже на участке туманности с малой плотностью газо-пылевой среды. Это особенно заметно на исправленном спектре туманности в положении щели 1 (рис. 6, 7), где выделяются линии  $\text{H}_2 \lambda 2.0418$  мкм +  $\text{He I} \lambda 2.0431$  мкм ( $X = 145$  пик-

селей),  $\text{He I } \lambda 2.0587$  мкм ( $X = 180$  пикселей),  $\text{Br}\gamma \lambda 2.1661$  мкм ( $X = 415$  пикселей).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный нами анализ спектрограмм показал, что интенсивности атмосферных линий значительно ( $\sim 10\%$ ) меняются в течение сета наблюдений; однако отношение линий неба, а также уровень континуума спектра варьируются крайне незначительно (в пределах  $\sim 1\%$ ).

Нами разработана методика, позволяющая корректно восстановить интенсивности ярких (относительно линий объекта) атмосферных линий гидроксила, получаемых при спектральных наблюдениях протяженных объектов, угловые размеры которых превышают длину щели спектрографа.

Предложенная методика исправления фона неба позволяет корректно измерять потоки в линиях  $\text{H}_2$  и некоторых других ( $\text{He I}$ ,  $\text{H I}$ ,  $[\text{Fe III}]$ ) и получать

параметры межзвездной среды: температуру и лучевую концентрацию молекулярного водорода в областях звездообразования. Как показали предварительные результаты, для самых ярких областей туманности NGC 7538 возможно изучение и более тонких эффектов, например, таких, как оценка отношения пара- к орто-водороду [11].

Авторы благодарят рецензентов за полезные замечания.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова (наблюдения, обработка данных, разработка и описание методики, написание текста) и государственного задания Института астрономии РАН (постановка задачи проекта, редактирование текста). Работа выполнялась с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

- [1] *Shatsky N., Belinski A., Dodin A. et al. // in Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century: Proc. All-Russian Conf.* Ed. by D.O. Kudryavtsev, A.F. Valeev, I.I. Romanyuk, and I.A. Yakunin (Spetsial'naya Astrofizicheskaya Observatoriya Ross. Akad. Nauk, Nizhny Arkhyz, Karachay-Cherkessia, 2020), pp. 127–132.
- [2] *Наджиб А.Э., Татарников А.М., Туми Д.У. и др. // Астрофиз. бюлл. 72, № 3, 382 (2017).* (*Nadjib A.E., Tatarnikov A.M., Toomey D.W. et al. // Astrophys. Bull. 72, N 3, 349 (2017).*)
- [3] *Татарников А.М., Желтоухов С.Г., Шатский Н.И. и др. // Астрофиз. бюлл. 78, № 3, 402 (2023).* (*Tatarnikov A.M., Zheltoukhov S.G., Shatsky N.I. et al. // Astrophys. Bull. 78, N 3, 384 (2023).*)
- [4] *Желтоухов С.Г., Татарников А.М., Шатский Н.И. // Письма в Астрон. журн. 46, № 3, 201 (2020).* (*Zheltoukhov S.G., Tatarnikov A.M., Shatsky N.I. // Astron. Lett. 46, N 3, 193 (2020).*)
- [5] *Jakobsen P., Ferruit P., Alves de Oliveira C. et al. // Astron. & Astrophys. 661, A80 (2022).*
- [6] *Böker T., Arribas S., Lützendorf N. et al. // Astron. & Astrophys. 661, A82 (2022).*
- [7] *Корнилов В.Г., Корнилов М.В., Шатский Н.И. и др. // Письма в Астрон. журн. 42, № 9, 678 (2016).* (*Kornilov V.G., Kornilov M.V., Shatsky N.I. et al. // Astron. Lett. 42, N 9, 616 (2016).*)
- [8] *Кирсанова М.С., Моисеев А.В., Татарников А.М. и др. // Астрофиз. бюлл. 81, в печати (2026).* (*Kirsanova M.S., Moiseev A.V., Tatarnikov A.M. et al. // Astrophys. Bull. 81, in press (2026), arXiv:2603.04041.*)
- [9] *Ojha D.K., Tamura M., Nakajima Y. et al. // Astrophys. J. 616, 1042 (2004).*
- [10] *Кирсанова М.С., Татарников А.М., Боли П.Э. и др. // Астрофиз. бюлл. 78, № 3, 389 (2023).* (*Kirsanova M.S., Tatarnikov A.M., Boley P.A. et al. // Astrophys. Bull. 78, N 3, 372 (2023).*)
- [11] *Puxley P.J., Ramsay Howat S.K., Mountain C.M. // Astrophys. J. 529, 224 (2000).*

## Sky background accounting in spectral infrared observations of extended objects at the Caucasus Mountain Observatory of the SAI MSU

A. S. Gusev<sup>1,a</sup>, A. M. Tatarnikov<sup>1,2</sup>, S. G. Zheltoukhov<sup>1</sup>, M. S. Kirsanova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119234, Russia*

<sup>2</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences  
Moscow 119017, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>gusev@sai.msu.ru*

The Caucasus Mountain Observatory of the Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University is the only one in Russia and one of the few in the world where is possible to obtain spectral data in the near-infrared (IR) range at  $\lambda = 1 - 2.5 \mu\text{m}$ . However, there is a problem of processing the spectra of extended objects, the angular dimensions of which exceed the length of the slit (4.5 arcmin). Obtaining additional spectra of the sky in the immediate vicinity of such objects does not solve the problem, since bright atmospheric hydroxyl lines at  $\lambda \sim 2 \mu\text{m}$  change their intensity significantly over a time shorter than

the exposure time of a single frame. We have developed a technique that allows us to correctly account for and exclude the contribution of variable atmospheric lines in the spectra of extended objects. This technique has been successfully tested in spectroscopic studies of the star-forming region NGC 7538 (S158) in our Galaxy.

PACS: 95.85.Jq, 95.75.Fg, 95.75.Mn

*Keywords:* infrared astronomy, spectroscopy, sky background

*Received 16 February 2026.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2026. **81**, No. 2, pp.

#### Сведения об авторах

1. Гусев Александр Сергеевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-22-45, e-mail: [gusev@sai.msu.ru](mailto:gusev@sai.msu.ru).
2. Татарников Андрей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: [andrey.tatarnikov@gmail.com](mailto:andrey.tatarnikov@gmail.com).
3. Желтоухов Сергей Геннадьевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: [srg7zh@gmail.com](mailto:srg7zh@gmail.com).
4. Кирсанова Мария Сергеевна — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 951-27-35, e-mail: [kirsanova@inasan.ru](mailto:kirsanova@inasan.ru).