АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 96, № 3, с. 205–218

УДК 524.338

ПОВЕРХНОСТНАЯ ФОТОМЕТРИЯ ПРОПЛИДОВ ИЗ ОКРУЖЕНИЯ ЗВЕЗДЫ θ^1 ORI C

© 2019 г. Г. Б. Мамедханова[1*], Н. З. Исмаилов[2]

[1] Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан

[2] Шемахинская астрофизическая обсерватория им. Н. Туси Национальной академии наук Азербайджана, Шемахы, Азербайджан

Поступила в редакцию 21.03.2018 г.; принята в печать 19.10.2018 г.

В работе приведены результаты исследований распределения поверхностной яркости группы молодых звездных объектов, расположенных в радиусе 16″ от звезды θ^1 Ori C. Были построены изофоты вокруг каждого проплида по изображениям, полученным в фиолетовых, красных и ближних инфракрасных лучах. Показано, что закономерность в размерах диаметральных сечений проплидов в разных фотометрических полосах не обнаруживается. Измеренные относительные интенсивности были выражены в абсолютных потоках излучения, оценены абсолютные светимости самой яркой части дисков и их периферии. Отношение диаметра большой оси к малой у разных объектов меняется от 1.5 до 2.5. Максимальная длина хвоста проплидов в разных фильтрах варьируется от 300 до 700 а.е. Показано, что для программных объектов длина хвоста становится меньше с уменьшением углового расстояния от освещающей звезды, что может быть объяснено усилением процесса диссипации диска с расстоянием вследствие возрастания роли фотоиспарения.

DOI: 10.1134/S000462991903006X

1. ВВЕДЕНИЕ

Большая Туманность Ориона (БТО) (NGC 1976, M42) является уникальной космической лабораторией для изучения процессов звездообразования и физических явлений, происходящих на ранней стадии эволюции звезд. Здесь находятся ближайшие к солнечной системе области HII, которые формируются под влиянием излучения расположенных там OB-звезд. Для расстояния до БТО давались оценки 430 пк [1] или по уточненным за последние годы данным 414 ± 7 пк [2]. Возрасты расположенных здесь протозвездных объектов составляют порядка 10^5–10^6 лет (см., например, [3–6]).

Одной из важных задач современной астрофизики является исследование образования планет в протопланетных дисках. Ключом к решению этого вопроса является исследование характеристик звезд и протозвездных образований, а также структуры протозвездных дисков в регионе БТО. Наиболее яркими объектами в этой области являются звезда θ^1 Ori C (Sp O6p), член известной Трапеции Ориона θ^1 Ori, и расположенная на несколько угловых минут южнее от нее звезда θ^2 Ori A (Sp O9). По прямым снимкам, полученным в ближней инфракрасной (ИК) области спектра, на расстоянии около 1 пк от этих ярчайших звезд обнаружено много протозвездных объектов, находящихся на стадии формирования (см., например, [7–8]).

В работе [9] около звезд Трапеции Ориона впервые были обнаружены объекты, отражающие излучение ближайших горячих звезд. Позже по наблюдениям в радиодиапазоне при помощи комплекса телескопов Very Large Array (VLA) у этих объектов было обнаружено радиоизлучение в континууме, соответствующее свободно-свободным переходам [10–11]. Хотя некоторые параметры этих объектов были определены в работах [10] и [12], основные их физические свойства были установлены после наблюдений на космическом телескопе “Hubble” (HST) [13]. Позже выяснилось, что это особый тип объектов, у которых под влиянием излучения ярких звезд происходит формирование газопылевой оболочки [14].

Фелли и др. [15, 16] по наблюдениям в радиодиапазоне обнаружили около 30 таких объектов. Примечательной особенностью их внешней структуры являются кометообразные хвосты, около головной части обнаруживаются дугообразные ярко излучающие области (арки), а головные части объектов направлены в сторону горячей звезды. По высококачественным ИК изображениям показано [17], что эти молодые образования идентичны

*E-mail: ismailovnshao@gmail.com

объектам, обнаруженным в VLA наблюдениях. У более 50 таких объектов О'Делл и др. [13] обнаружили эмиссионные линии излучающего газа. Авторы [13] впервые назвали эти объекты "проплидами" (PROtoPLanetarY DiskS, proplyds) — протопланетными дисками — и описали их основные характеристики. Далее список проплидов был дополнен в разных работах (см., например, [18–20]). В работах [19–22] была обнаружена местами неоднородная структура проплидов в инфракрасном диапазоне. Опубликован каталог, содержащий 153 проплидов [14], но пополнение списка новыми объектами активно продолжается (см., например, [23–25]).

Теперь известно, что проплиды — рассеивающие свет околозвездные диски вокруг молодых звездных объектов (Young Stellar Object, YSO). Они состоят из 1) околозвездного диска, 2) головы с ярким серпообразным ободом, 3) устойчивого ударного фронта и 4) хвоста. Формирование проплидов как отдельного класса объектов было смоделировано в работах [23, 26–28]. Основное предположение в таких моделях состоит в том, что оболочки проплидов являются оптически толстыми в линии Lα, что является причиной нагрева оболочки фотонами. Формы проплидов возникают из-за взаимодействия ультрафиолетового (УФ) ионизующего излучения горячей звезды и фоторассеянного потока околозвездного диска. Одним из механизмов разрушения проплидов в условиях БТО является фотоиспарение, которое возникает под воздействием УФ излучения от ближайших OB звезд, в результате чего эти объекты теряют массу со скоростью порядка $\dot{M} \approx 10^{-7}\ M_{\odot}$ год$^{-1}$ [10, 29]. Такой темп потери массы в диске достаточен, чтобы в нем примерно за 10^6 лет сформировалась планетная система. Поэтому объекты, подвергающиеся сильному УФ излучению и переживающие фотоиспарение, редко обнаруживаются в относительно более старых областях звездообразования, как, например, Carina [30], Pismis 24 [31] и Cyg OB2 [32]. Определение начальной массы проплидов является ключом к уточнению роли процесса фотоиспарения в диссипации диска и формировании планет.

Предполагается существование двух основных механизмов, которые могли бы способствовать диссипации околозвездных протопланетных дисков: гравитационное взаимодействие звезды с диском и фотоиспарение. В плотных звездных скоплениях за время жизни диска (около 3–10 миллионов лет) гравитационное взаимодействие с другими звездами может создавать возмущение в диске, расширить его до определенных границ, создавать на поверхности диска области высокой плотности вещества (см., например, [33, 34]). Имеется всего несколько объектов, в которых обнаруживаются признаки диссипации диска вследствие гравитационного взаимодействия (см., например, [35]).

Более эффективным механизмом диссипации околозвездных дисков является фотоиспарение. Экстремально интенсивное УФ излучение соседней звезды, например, θ^1 Ori C, может нагреть протопланетный диск до $\sim 10^4$ K. Этим порождается истечение ионизованного газа, контролирующее условия во внешних частях диска и его фотоиспарение (см., например, [36, 37]).

Процесс образования планет в протопланетных дисках, которые подвергаются сильному УФ излучению горячих звезд в условиях БТО, должен значительно отличаться от процессов планетообразования в обычных условиях. Поэтому исследование физических характеристик проплидов, находящихся в экстремально сложных условиях туманности Ориона, представляет значительный интерес. Целью настоящей работы является исследование структуры околозвездных протопланетных дисков, расположенных наиболее близко к звезде θ^1 Ori C.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В качестве наблюдательного материала для наших исследований были использованы прямые изображения области звезды θ^1 Ori C, взятые из архива MAST HST[1]. Наблюдения были выполнены в 21.01.2004 г. на телескопе HST с помощью камеры WFPC1 с угловым разрешением 0.049″. При расстоянии до туманности Ориона, равном 420 пк [2], для линейного разрешения получим величину 21 а.е. Это разрешение позволяет изучить структуру околозвездных дисков вокруг молодых звездных объектов. При получении ПЗС-изображений были использованы разные интерференционные фильтры. Координаты области наведения — $\alpha(2000) = 05^{\rm h}35^{\rm m}16.5^{\rm s}$, $\delta(2000) = -05°23'23.10''$, рабочее поле составляло 0.215′. Подробная информация об использованной аппаратуре приведена на специальном сайте[2]. Примеры исследования изображений HST изложены в многочисленных работах (см., например, [13, 14, 38]).

Были использованы пять разных узкополосных фильтров. В табл. 1 приведены сведения об использованном материале. В столбцах таблицы слева направо приводятся: название кадра в FITS формате, использованный фильтр, центральная длина волны фильтра и время получения кадра в UT. Все полученные кадры прошли первичную обработку (dark,

[1] https://archive.stsci.edu/hst/
[2] http://www.stsci.edu/hst/acs/

Таблица 1. Сведения об использованных наблюдениях

Обозначение кадра	Фильтры	Центральная длина волны, Å	Всемирное время, UT 21.01.2004
J8UP02USQ	FR656N	6562.899	18:51
J8UP02UTQ	FR656N	6583.798	18:52
J8UP02UUQ	FR656N	6716.176	18:53
8UP02UWQ	FR388N	3870.905	14:24
8UP02UYQ	FR505N	5007.276	14:25
8UP02V0Q	FR505N	4959.490	18:56
J8UP02V5Q	FR459M	3888.047	18:59
J8UP02V7Q	FR459M	4351.635	19:00
8UP02V9Q	FR459M	5005.612	19:01
8UP02VBQ	FR914M	7727.726	19:02
8UP02VCQ	FR914M	9000.273	19:03
8UP02VDQ	FR914M	9412.057	19:04

bias, flat field, hot pixels, cosmic rays и т.д.) и калиброваны по экваториальным координатам. Это позволяет произвести фотометрическое измерение деталей в изображениях по точным координатам. Подробное описание процесса обработки наблюдательного материала из архива HST изложено в соответствующем руководстве[3].

3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нами были отобраны наиболее яркие проплиды, расположенные около звезды θ^1 Ori C (табл. 2). В столбцах табл. 2 приводятся порядковый номер, название объекта, экваториальные координаты, другие обозначения, расстояния от звезды в парсеках и в угловых секундах. Для расстояний проплидов от звезды θ^1 Ori C использованы данные из работ [23] и [38], которые в пределах ошибок не отличаются от расстояния до БТО. Мы использовали уточненные данные для расстояния до комплекса БТО, и расстояние до проплидов было принято равным 420 пк. Пересчитанные нами расстояния для каждого проплида в проекции на картинную плоскость приведены в табл. 2 в парсеках. Все выбранные объекты находятся на угловом расстоянии не более 16″ от звезды θ^1 Ori C.

[3] http://www.stsci.edu/hst/acs/documents/handbooks/currentDHB/acs dhb.pdf

4. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для обработки данных использовалась программа MIDAS, работающая в системе Linux Ubuntu. Мы руководствовались стандартной методикой поверхностной фотометрии (см., например, книгу [39]). Для построения распределения интенсивности по поверхности проплидов выбирается направление, по которому строится фотометрическое сечение. Это позволяет оценить величину интенсивности от минимума до максимума по фотометрическому разрезу объекта. После расставления опорных точек вдоль выбранного направления мы получаем таблицу распределения интенсивности по экваториальным координатам (α, δ). Из этой таблицы выбираются максимальные и минимальные значения интенсивности по данному изображению и устанавливается шаг для построения изофот по распределению интенсивности вокруг области изображения. После этого создаются изображения с изофотами по интенсивности данного изображения на двумерном графике с координатами (α, δ). Дальнейшая обработка выполнялась по этим изображениям в программе Ds9.

В работе О'Делла [18] в качестве характерного размера проплида принято расстояние между острыми концами яркого серповидного образования. В изображениях не всегда возможно четко выделить серповидную часть проплида от ядра. Поэтому мы выделили два направления, по которым были определены характерные размеры околозвездного окружения проплида. Первое направление проводилось по прямой линии, проходящей вдоль головы, ядра и хвоста проплида, а второе перпендикулярно к этому направлению, проходящее через ядро — наиболее яркую часть проплида. Первое направление мы условно обозначили через y (большая ось), а второе направление — x (малая ось). Также были отмечены координаты центра ядра проплида — точки пересечения осей x и y, совпадающей с центром яркой части ядра. Координаты y от яркой головы до центра (от направления освещающей звезды θ^1 Ori C) условно обозначались знаком "минус", а координаты после центра — знаком "плюс". Отрицательные координаты x соответствуют левой, положительные — правой части ядра проплида на картинной плоскости. Каждой координате соответствует определенная интенсивность.

На рис. 1 для примера показаны изофоты трех разных проплидов — 163–317, 158–326 и 176–325 — и схема измерения расстояний по изображениям. Для каждого фильтра приводятся минимум, максимум и шаг интенсивности по изофотам. Прямые отрезки на рис. 1 указывают направления осей x и y, проведенных по большой и малой

Таблица 2. Отобранные программные объекты

№	Обозначение объекта	α(2000) (h m s)	δ(2000) (° ′ ″)	Другое обозначение объекта	d(пк)	d″
1	157–323	5:35:15.74	–5:23:22.49	LV5	0.023	11.3
2	158–323	5:35:15.84	–5:23:22.47	LV5	0.019	9.5
3	158–326	5:35:15.85	–5:23:25.56	LV6	0.019	9.5
4	158–327	5:35:15.79	–5:23:26.56	LV6	0.021	10.5
5	161–322	5:35:16.07	–5:23:24.37	LV4	0.012	6
6	163–317	5:35:16.29	–5:23:16.55	LV3	0.014	7.1
7	166–316	5:35:16.62	–5:23:16.12	LV2	0.014	7.1
8	167–317	5:35:16.75	–5:23:16.44	LV2	0.015	7.6
9	168–328	5:35:16.77	–5:23:28.05	LV1	0.014	7
10	168–326	5:35:16.85	–5:23:26.22	LV1	0.012	5.96
11	176-325	5:35:17.55	–5:23:24.96		0.034	16.5

Таблица 3. Данные избранных звезд поля, использованных для калибровки

Звезда	α(2000) (h m s)	δ(2000) (° ′ ″)	U	V	I
LV2	05 23 16.75	–05 23 16.44	14.712	13.678	13.081
V2299 Orі	05 35 17.06	–05 23 34.2	14.962	13.322	11.118
V2325 Orі	05 35 18.197	–05 23 35.93	16.366	13.923	11.431
MAX 130	05 35 17.45	–05 23 21.0		15.82	12.967
MAX 123	05 35 17.04	–05 23 37.7			13.224

осям эллипса. Сравнение показало, что можно существенно отличить распределения интенсивности, полученные, в основном, в трех фильтрах — FR388N, FR656N и FR914M. Поэтому в дальнейшем для анализа мы будем использовать данные, полученные по этим трем фильтрам.

На рис. 1 видно, что структура объектов значительно различается в разных фильтрах. В фильтре FR388N объект 176-325 имеет эллиптическую форму, где выступ хвоста едва заметен. В полосе FR656N вырисовывается структура с хвостом и головной частью. В красной полосе FR914M мы также видим хвост проплида, выраженный слабее, чем в полосе Hα, но при этом радиус диска здесь заметно больше, чем в остальных фильтрах (табл. 3). Аналогичный характер распределения яркости наблюдается и у объекта 158-326. В обоих случаях наблюдается возрастание диаметров излучающей поверхности с увеличением длины волны. У объекта 163-317 подобная закономерность не наблюдается.

4.1. Учет инструментального контура (PSF)

Для учета влияния аппаратной функции были обработаны изображения нескольких стандартных звезд поля, полученные в разных фильтрах с помощью той же камеры. На рис. 2 для примера приводятся изофоты звезды-стандарта MAX 123 (табл. 3), полученные в фильтре FR914M, и построенное по этому изображению распределение поверхностной яркости. Для оценки отношения сигнала к шуму S/N мы брали отсчеты близлежащего фона и максимального значения интенсивности, измеренной у объекта. Величина S/N для данного стандарта в максимуме интенсивности составила около 350, а в минимуме — около 100. Величина относительной ошибки по интенсивности варьируется от 0.28% на вершине до 1% в нижней части крыльев. Для большинства проплидов величина S/N в минимуме интенсивности находится в интервале от 10 до 40. При этом величина относительной ошибки по интенсивности составляла от 10% до 2.5 % соответственно.

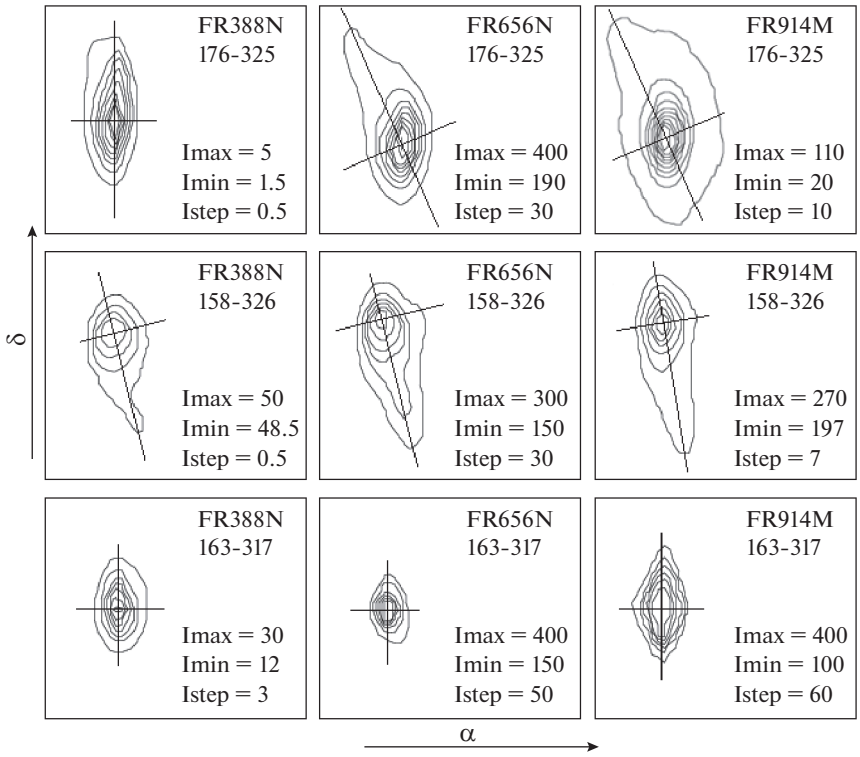

Рис. 1. Слева направо — примеры изофот трех объектов в фильтрах FR388N, FR656M и FR914M: сверху 163–317, в центре 158–326 и снизу 176–325. На каждой панели приводятся величины максимальных (Imax), минимальных (Imin) значений интенсивностей и шаг (Istep) проведения изофот. Стрелками показаны направления возрастания экваториальных координат α и δ.

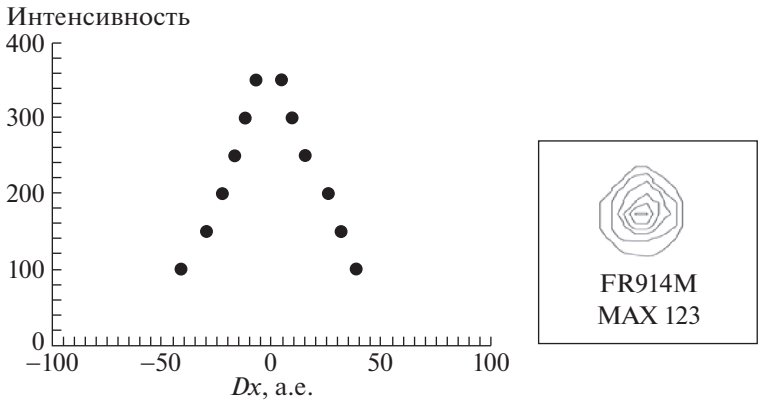

Рис. 2. Справа в отдельной рамке приведены изофоты звезды MAX 123, построенные в фильтре FR914M. Слева показана диаграмма распределения поверхностной яркости в относительных единицах. Уровень относительных ошибок отдельных точек по интенсивности меньше, чем диаметр кружка.

Как видно из рис. 2, ширина инструментального контура на уровне половины интенсивности соответствует FWHM $\approx$ 50 а.е. Это показывает максимальную величину инструментального искажения в данной камере по распределению интенсивности для точечного источника. Аналогичные величины FWHM для стандартных звезд нами получены и для других фильтров. Если кривая распределения яркости имеет ширину на уровне половины интенсивности (FWHM) около 50 а.е., этот объект нужно считать близким к точечному. Из нашей выборки несколько проплидов в фильтре FR388N вдоль малой оси имели точечное изображение, а в остальных фильтрах изображения объектов являются более протяженными. Их сечения по большой и малой оси чаще всего значительно превосходят инструментальное расширение.

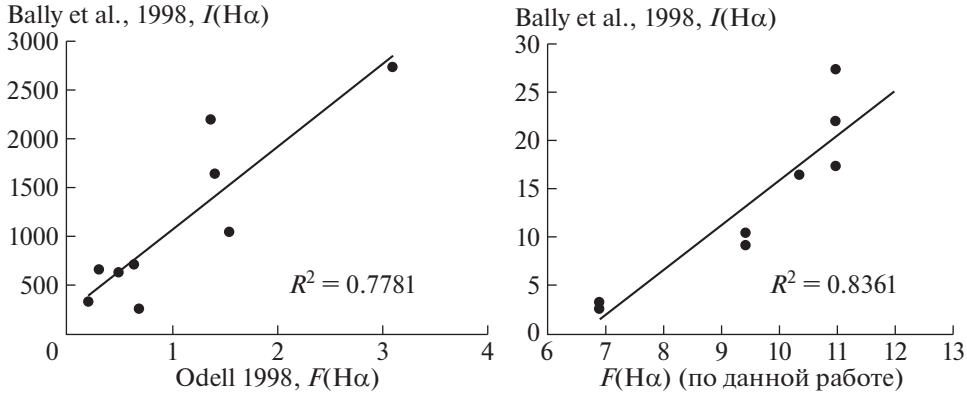

Рис. 3. Сравнение данных О'Делла [38] и Балли и др. [49] (слева) и данных Балли и др. [49] с нашими измерениями для полосы *Fv* (обозначено $F(\mathrm{H}\alpha)$). Точки на каждой диаграмме аппроксимированы линейным полиномом с величиной достоверности аппроксимации R^2 для каждого сравнения.

4.2. Калибровка изображений WFPC1

Для приведения полученных значений интенсивности сигнала к абсолютному потоку излучения нами были измерены интенсивности четырех звезд поля и проплида LV2 (167-317), у которых измерены звездные величины в разных полосах стандартной системы UBVRI [40]. Чтобы оценить интенсивности выбранных звезд-стандартов, были использованы те же кадры, в которых было построено распределение поверхностной интенсивности проплидов. В табл. 3 приводится список используемых для этого звезд поля, их координаты, а также звездные величины в полосах U, V и I. По центральной длине волны эти полосы наиболее близки к полосам FR388N, FR656N и FR914M. Перевод звездных величин, приведенных в табл. 3, в абсолютные потоки излучения был выполнен относительно монохроматического потока излучения стандартной звезды A0V с нулевым блеском и показателями цвета [41]. Для калибровки было использовано три значения для полосы U, четыре значения для полосы V и пять значений для полосы I (табл. 3). Таким образом, были получены коэффициенты перевода относительных интенсивностей в абсолютные монохроматические потоки в трех полосах FR388N, FR656N и FR914M. Далее, зная значения относительных интенсивностей для отобранных звезд в каждой полосе, мы определяли поток на единицу интенсивности. Средние значения этих коэффициентов таковы: $Ku = (2.52 \pm \pm 1.58) \times 10^{-16}$, $Kv = (3.14 \pm 1.44) \times 10^{-17}$ и $Ki = = (2.57 \pm 1.11) \times 10^{-17}$ для полос U, V и I, соответственно выраженные в единицах эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ Е$^{-1}$. Для перевода измеряемой интенсивности в данной полосе в абсолютные потоки излучения эти коэффициенты умножались на величину интенсивности в каждой измеряемой точке.

Следует отметить, что значительный вклад в излучение объектов БТО вносит экстинкция. Поскольку M42 находится на большой галактической широте, здесь общая межзвездная экстинкция не так значительна. Однако здесь возникает локальная экстинкция из-за нейтрального вещества в зоне БТО. Такая локальная экстинкция зависит от длины волны и меняется по всему фронту БТО (см. например, [42, 43]).

Величина экстинкции у звезды θ^1 Ori C впервые была определена в работе Джонсона [44] как $A_\mathrm{v} = = 1.6$. Распределение экстинкции, определенное в работе [45], подтвердило это значение. Далее, в работе [46], по распределению энергии в радиодиапазоне установлено, что экстинкция в полосе V около названной звезды равна $\sim 1^\mathrm{m}$. Далее было предпринято много разных усилий для оценки величины экстинкции в этом регионе. Из последних работ можно отметить, например, Да Рио и др. [47, 48], у которых величина A_v в этом регионе равна 1.0–1.5. Исходя из этого, при вычислении параметров объектов мы использовали среднее значение $A_\mathrm{v} = = 1.3$.

В табл. 4 приведены результаты измеренных максимальных значений абсолютных потоков с вычетом фона и с учетом межзвездной экстинкции для каждого объекта. Кроме того, вычислены монохроматические потоки излучения, соответствующие также и минимальной интенсивности, т.е. для периферии диска для каждого проплида. В последних трех столбцах табл. 4 приведены значения соответствующих отношений потоков максимума к минимуму для каждого фильтра. Как видно, это отношение по разным полосам в среднем достигает 5, хотя в отдельных случаях, например, для 168–326, оно составляет 20–30. Медианное значение отношений максимального значения потока к минимальному по всем 11 проплидам в фильтрах

Таблица 4. Измеренные величины максимального монохроматического потока излучения проплидов в единицах эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ Е$^{-1}$ и отношение максимального к минимальному значений потоков

Объект	$Fu \times 10^{-14}$	$Fv \times 10^{-14}$	$Fi \times 10^{-14}$	$Fu(\max)/Fu(\min)$	$Fv(\max)/Fv(\min)$	$Fi(\max)/Fi(\min)$
157–323	0.734	1.04	0.99	2.07	2.54	4.53
158–323	0.734	1.04	0.99	2.64	4.13	4.53
158–326	1.24	0.69	0.64	1.03	3.14	1.41
158–327	1.24	0.69	0.59	1.07	5.50	4.60
161–322	0.48	1.10	0.35	2.71	7.00	2.45
163–317	0.71	1.10	1.0	2.80	3.50	4.33
166–316	0.99	1.10	1.0	1.18	1.75	1.26
167–317	0.99	1.10	1.0	3.55	3.18	4.33
168–328	0.45	0.94	0.49	1.50	2.00	2.11
168–326	0.45	0.94	0.49	36.00	6.00	19.00
176-325	0.13	1.16	0.27	3.33	2.31	6.29

FR388N, FR656N и FR914M составляет 2.64, 3.18 и 4.33 соответственно.

Надо отметить, что оценка величины потока излучения в полосе Hα для группы проплидов в БТО была проведена, в основном, в работах [38] и [49]. В табл. 1 из работы [38] приводятся потоки $F_{\mathrm{H}\alpha}$ в линии Hα в единицах фотон см$^{-2}$с$^{-1}$. В табл. 4 из работы [49] приводятся аналогичный параметр $I(\mathrm{H}\alpha)$ в единицах 10^{-16} эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$. Полученный нами монохроматический поток Fv в полосе Hα должен быть пропорционален указанным параметрам из работ [38, 49]. В дальнейшем, во избежание путаницы мы сохраняем обозначения величины потока в полосе Hα у каждого автора. Из 11 исследуемых нами объектов у восьми этот параметр имеется у всех вышеназванных авторов и у нас.

На левой панели рис. 3 показан график сравнения значений $F_{\mathrm{H}\alpha}$ [38] и $I(\mathrm{H}\alpha)$ [49]. На правой панели наши данные сравниваются с данными [49]. Как видно, данные разных авторов связаны линейной зависимостью. На рис. 3 точки на каждой диаграмме аппроксимированы линейным полиномом с величиной достоверности аппроксимации R^2 для каждого сравнения.

Получены следующие формулы (1), связывающие значения сравниваемых параметров $I(\mathrm{H}\alpha)$ [49], $F_{\mathrm{H}\alpha}$ [38] и наши измерения Fv.

$$I(\mathrm{H}\alpha) = 848.98F_{\mathrm{H}\alpha} + 212.97, \qquad (1)$$
$$I(\mathrm{H}\alpha) = 4.64Fv - 30.571.$$

Обе диаграммы показывают примерно одинаковый уровень разброса точек и одинаковую величину достоверности аппроксимации полиномом. Это свидетельствует о том, что величины $I(\mathrm{H}\alpha)$, $F_{\mathrm{H}\alpha}$, и Fv выражают количество потока в линии Hα примерно с одинаковой точностью и согласуются между собой.

Используя измеренные относительные интенсивности звезд поля, список которых приведен в табл. 3, мы вычислили звездные величины в фильтрах U, V и I всех 11 объектов относительно указанных стандартов. Мы заметили, что полученные звездные величины отдельных объектов, определенные относительно разных звезд поля, значительно различаются. Например, в полосах U и I у одного и того же объекта различие в блеске иногда доходит до 0.7–1.0 звездной величины. Причину такого разброса, по-видимому, можно объяснить переменностью блеска самих проплидов или звезд поля, блеск которых в [40] определялся в разное время. Несмотря на это, полученные звездные величины дают возможность оценить абсолютную светимость отдельных объектов. В табл. 5 приведены усредненные звездные величины проплидов в фильтрах U, V, I, полученные относительно разных стандартов, и относительные ошибки их определения. Зная звездную величину в полосе V, расстояние до объектов (420 пк) и среднее межзвездное покраснение $A_{\mathrm{v}} = 1.3$, мы вычислили абсолютные звездные величины $M\mathrm{v}$ каждого проплида. Для определения светимости объектов $L\mathrm{v}$ мы использовали значение абсолютной звездной величины Солнца $M\mathrm{v}_{\odot} = 4.8^{\mathrm{m}}$. В табл. 5 приводятся полученные абсолютные звездные величины светимости проплидов, вычисленные с учетом межзвездной экстинкции. Значения светимости весьма чувствительны к величине экстинкции, поэтому, учитывая, что величина межзвездной экстинкции

Таблица 5. Звездные величины проплидов и их светимости

Объект	U	ε, %	V	ε, %	I	ε, %	$Mv\,(\pm0.4)$	$L_\odot\,(\pm0.3)$
157–323	15.16	5.0	13.54	1.9	13.00	14.1	5.0	0.82
158–323	15.16	5.0	13.54	1.9	13.00	14.1	5.0	0.82
158–326	15.72	4.9	13.10	2.0	12.53	14.7	4.6	1.24
158–327	15.72	4.9	13.10	2.0	12.44	14.8	4.5	1.26
161–322	14.70	5.2	13.60	1.9	11.86	15.5	4.8	1.02
163–317	15.12	5.1	13.60	1.9	13.01	14.1	5.1	0.78
166–316	15.48	4.9	13.60	1.9	13.01	14.1	5.1	0.78
167–317	15.48	4.9	13.60	1.9	13.01	14.1	5.1	0.78
168–328	14.64	5.2	13.44	1.9	12.23	15.0	4.7	1.05
168–326	14.64	5.2	13.44	1.9	12.23	15.0	4.7	1.05
176–325	13.25	5.8	13.67	1.9	11.61	15.8	4.7	1.03

Таблица 6. Максимальные размеры проплидов по двум сечениям x и y

Фильтры	FR388N			FR656N			FR914M		
Объекты	Dx(а.е)	Dy(а.е)	Dy/Dx	Dx(а.е)	Dy(а.е)	Dy/Dx	Dx(а.е)	Dy(а.е)	Dy/Dx
157–323	164	217	1.32	107	161	1.50	143	254	1.78
158–323	156	217	1.39	157	258	1.64	181	261	1.44
158–326	140	336	2.40	164	406	2.48	125	234	1.87
158–327	201	476	2.37	251	719	2.86	314	718	2.29
161–324	167	208	1.25	171	459	2.68	80	147	1.84
163–317	168	297	1.77	121	167	1.38	176	215	1.22
166–316	108	144	1.33	94	117	1.24	77	127	1.65
167–317	184	226	1.23	233	343	1.47	132	188	1.42
168–328	75	113	1.51	90	132	1.47	128	173	1.35
168–326	237	230	0.97	252	230	0.91	279	226	0.81
176–325	73	192	2.63	98	253	2.58	150	347	2.31
Среднее	151.5	242.1	1.66	156	297.0	1.86	157.5	267.5	1.67

по разным данным различается до ±0.3, средняя ошибка определения светимости с учетом относительной ошибки 2% (табл. 5) составит около $\pm0.3L_\odot$.

5. ХАРАКТЕРНЫЕ РАЗМЕРЫ

В табл. 6 приведены результаты измерений диаметров сечений каждого проплида в трех фильтрах. Эти размеры являются одним из фундаментальных параметров проплидов. Диаметры определялись точностью 1–2 пикселя, поэтому при разрешении $0.045''$/пиксель максимальное значение ошибки составляет около 50 а.е. Как видно из табл. 6, максимальные диаметры указанных сечений у большинства объектов намного превосходят инструментальное расширение. Наибольшие размеры сечений получены у проплида под номером 158–327, особенно в красной и инфракрасной части излучения. В табл. 6 приводится также отношение длины большой оси Dy к длине малой оси Dx. В нижней строке приведены средние значения

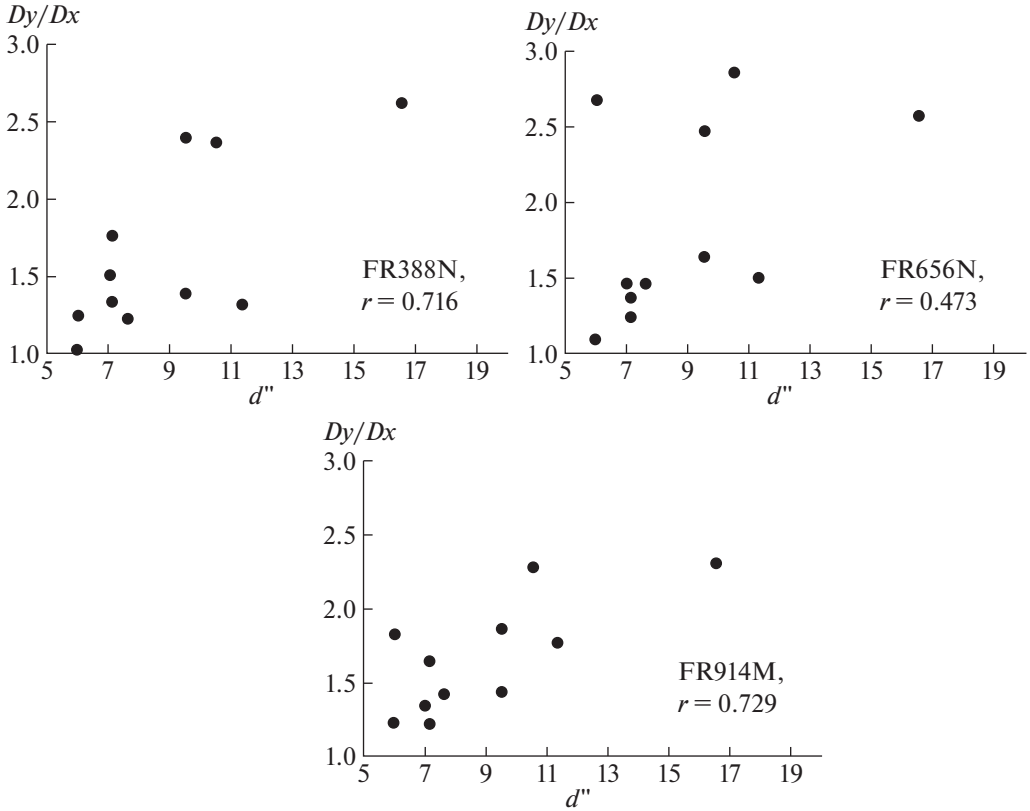

Рис. 4. Зависимость отношений Dy/Dx и углового расстояния от звезды θ^1 Orі C, полученные в разных фильтрах. В каждой панели указан фильтр и значение коэффициента корреляции r.

измеренных расстояний и их отношений по всем объектам. Эти значения дают характерные размеры околозвездных дисков в ранней стадии их формирования. В работе [38] приводятся размеры яркой серпообразной головной части отдельных проплидов, которые у разных объектов составляют от 60 а.е. до 500 а.е.

Мы проверили существование корреляции между отношением Dy/Dx и угловым расстоянием от освещающей звезды θ^1 Orі C. Соответствующие графики для указанных трех фильтров приводятся на рис. 4. На каждой панели приведен тип фильтра и вычисленное нами значение коэффициента корреляции r по Пирсону. Коэффициенты корреляции между указанными параметрами в полосах FR388N, FR565N и FR914M равны 0.716 ± 0.232, 0.473 ± 0.258 и 0.729 ± 0.156 соответственно. Достоверность полученных коэффициентов корреляции составляет не меньше 95%. Видно, что у проплидов, находящихся на угловом расстоянии менее $16''$ от звезды θ^1 Orі C (см. табл. 2), обнаруживается заметная корреляция между параметром Dy/Dx и угловым расстоянием до звезды. Зависимость длины хвоста от расстояния может быть результатом фотоиспарения, которое усиливается с расстоянием от фотовозбуждающей звезды. По-видимому, это оказывает разрушительное воздействие на околозвездный диск проплида и усиливает темп диссипации.

Мы проверили также существование корреляции между отдельными параметрами Dy и Dx. На рис. 5 приведены графики зависимости Dy от Dx. Эти зависимости близки к линейным, поэтому по полученным точкам мы провели прямые. Полученные формулы зависимости приведены на каждой панели рис. 5. Каждая панель соответствует данным для одного фильтра. Коэффициенты корреляции между параметрами Dy и Dx для отдельных полос FR388N, FR565N и FR914M равны 0.564 ± 0.227, 0.742 ± 0.15 и 0.881 ± 0.074 соответственно. В той же последовательности фильтров зависимость Dy от Dx можно выразить линейными формулами (4) вида

$$Dy = 1.13Dx + 70.74 \text{ (для FR388N)}, \quad (4)$$
$$Dy = 2.21Dx - 47.73 \text{ (для FR565N)},$$
$$Dy = 2.12Dx - 66.44 \text{ (для FR914M)}.$$

Корреляция в фиолетовых лучах выражена слабее, чем в красных и ближних ИК лучах. Это говорит о том, что структура диска у проплидов в фиолетовых лучах выражена слабее. Существование линейной зависимости диаметров Dy и Dx, по-видимому,

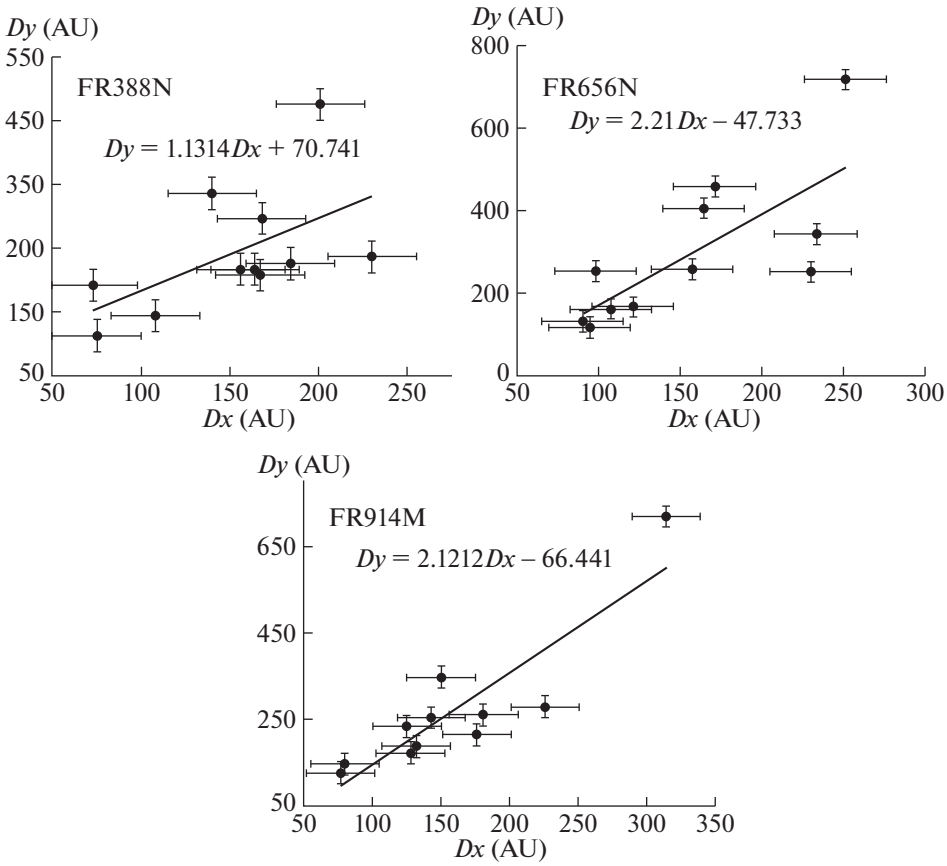

Рис. 5. Зависимость размеров диска проплидов Dy от Dx. Каждая панель рисунка получена по отдельным фильтрам. Прямыми линиями показаны линейные регрессии, формулы которых приводятся на каждой панели.

свидетельствует о том, что наблюдаемые размеры дисков формируются пропорционально количеству вещества в центральной массе объекта.

Зависимость размеров протозвездных дисков от длины волны излучения не обнаруживается. У разных объектов в фиолетовых, красных и ближних ИК лучах с длиной волны размеры могут сохраняться, увеличиваться, или, напротив, уменьшаться. Из табл. 6 видно, что размеры, полученные в разных фильтрах для одного и того же проплида, меняются по-разному. Например, у 157–323 размеры в полосе FR565N меньше, чем в FR388N, а в полосе FR914M значительно больше. У проплида 176–325 с увеличением длины волны размеры возрастают примерно в два раза. У проплида 166–316 с увеличением длины волны наблюдается постепенное уменьшение размера.

5.1. Характер распределения интенсивности

На рис. 6 для примера приведены графики распределения интенсивности в направлениях большого (y) и малого (x) диаметра с расстоянием от наиболее яркой центральной части проплида 176–325. Распределение интенсивности в обоих направлениях имеет колоколообразную форму. По оси x левое крыло распределения соответствует левой стороне, правое крыло — правой стороне от центра. По оси y левое крыло соответствует распределению от головы до центра (т.е. от освещающей звезды), правая — от центра до конца хвоста. Чтобы перевести величины интенсивности на рис. 6 в абсолютные потоки, данные по оси ординат нужно умножать на соответствующие коэффициенты трансформации (см. раздел 4.2).

Как видно из этих графиков, в фильтрах FR388N и FR656N распределение интенсивности по оси x мало отличается от инструментального контура. В полосе FR914M интенсивность проплида прослеживается до расстояния, превышающего этот предел. По оси y из-за наличия хвоста в распределении наблюдается определенная асимметрия.

Как указано в работе Балли и др. [49], диаграммы распределения интенсивности эмиссионных линий в радиальном направлении можно описывать степенной функцией $\sim r^{-\alpha}$, где r — расстояние от центра проплида по азимуту, α — коэффициент, значение которого равно $\sim$3. Однако для некото-

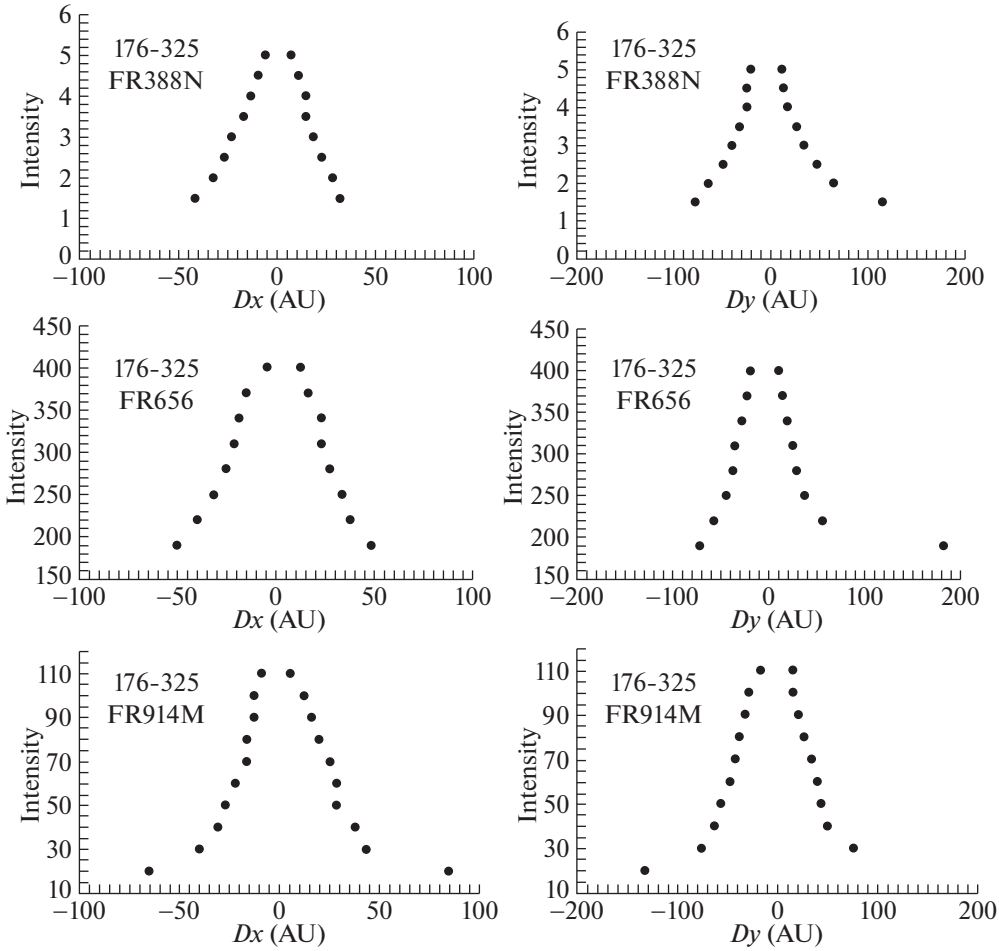

Рис. 6. Распределение поверхностной яркости в зависимости расстояния от центра проплида 176-325 в двух направлениях x и y. Каждая пара рисунков соответствует одному фильтру по двум направлениям от центра.

рых объектов распределение лучше аппроксимируется экспоненциальной функцией.

Мы попытались аппроксимировать полученное распределение интенсивности в континууме в двух радиальных направлениях. Для аппроксимации были выбраны те же радиальные направления x и y по малой и большой оси проплида. Как видно из рис. 6, форма кривой распределения интенсивности проплидов имеет колоколообразный вид. Левая ветвь кривой соответствует радиальному направлению от края до центра, а правая ветвь — от центра до другого края в том же направлении по оси x. Аналогичным образом построено распределение интенсивности по поверхности по направлению большой оси y — от головы, центра и хвоста. Следовательно, левая часть ветви по направлению y соответствует распределению интенсивности от головы до центра, а правая часть — от центра до конца хвоста проплида.

На рис. 7 приводится пример аппроксимации распределения абсолютного потока по поверхности для проплида 161-322, полученной в фильтре FR656N. По направлению x распределение лучше аппроксимируется многочленом 3-й степени (левая панель), а по направлению y — степенной функцией с коэффициентами $\alpha \approx -0.712$ и -1.556 (правая панель). Выражения соответствующих функций аппроксимации приведены на панелях рис. 7. Различные значения α по направлению y соответствуют распределениям от головы до центра и от центра до конца хвоста соответственно. Для разных проплидов по направлению y значение коэффициента α меняется в широком диапазоне, от -0.3 до -1.5. Также на рис. 7. приведены величины достоверности R^2, выражающие качество аппроксимации. Светлыми кружками обозначены положительные, темными кружками — отрицательные величины расстояния Dx и Dy (см. рис. 6). Как видно, из-за существующей асимметрии в распределении интенсивности по направлению x функция аппроксимации различается. Если же применить в направлении x аппроксимацию степенной функцией с коэффициентом $\alpha < 0$, а в направлении y — аппроксимацию кубическим многочленом, то

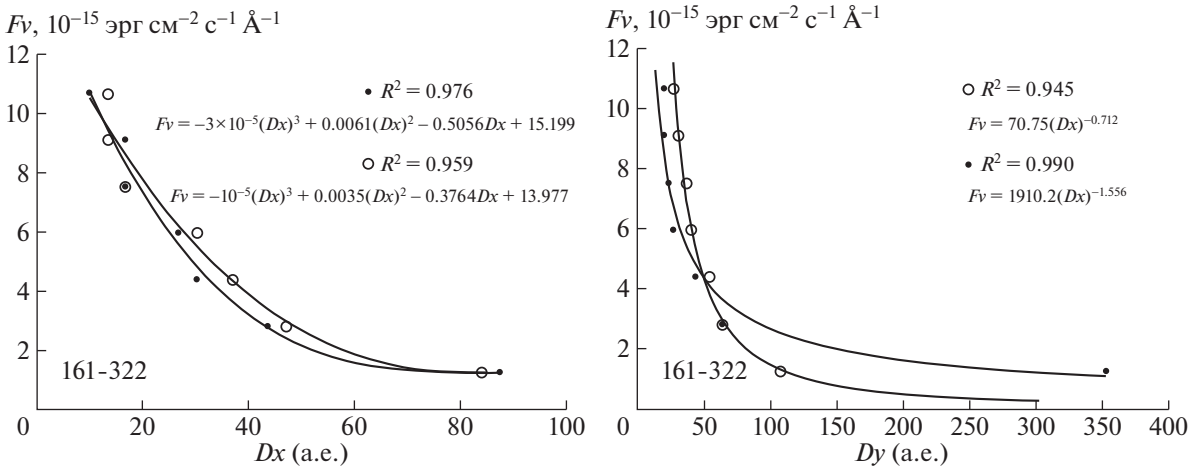

Рис. 7. Аппроксимация кривых распределения поверхностной интенсивности для проплида 161-322 в фильтре FR656N. На левой панели темные кружки — левая ветвь, светлые — правая ветвь распределения от центра в направлении x. На правой панели темные кружки — от головы до центра, светлые кружки — от центра до конца хвоста в направлении y. На панелях приведены формулы соответствующих функций аппроксимации и значения величины достоверности аппроксимации R^2.

величина R^2 уменьшается до 0.75. Аналогичный результат был получен нами и для всех остальных проплидов.

Отсюда следует, что а) вещество в излучающих областях диска проплидов распределено несимметрично, б) уменьшение плотности вещества вдоль хвоста может быть лучше представлено степенной функцией с коэффициентом $\alpha < 0$, а вдоль направления малой оси x — многочленом 3-й степени. Это указывает, что распределение физических параметров вещества вдоль хвоста и головы проплида существенно отличается от распределения вдоль малой оси проплида.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Протопланетные диски у молодых звездных объектов за время в несколько миллионов лет накапливают газ и пыль для формирования планет. После этого относительно короткого времени в планетах остается только небольшая часть начальной массы диска. Предполагается, что часть остального вещества диска выпадает на центральную звезду в результате аккреции или выметается из диска. Одним из предлагаемых механизмов для этого является фотоиспарение (см. обзоры [50, 51]).

Используя узкополосные ПЗС-изображения с угловым разрешением 0.049″, полученные на телескопе HST, мы изучили распределение яркости по поверхности группы проплидов, находящихся в пределах углового расстояния 16″ от ярчайшей звезды θ^1 Ori C. Показано, что при таком угловом разрешении ширина инструментального профиля FWHM составляет около 50 а.е. Это позволяет изучить распределение яркости по поверхности проплидов, у которых околозвездные диски имеют размеры в пределах от 200 до 1000 а.е. [49, 52].

Нами показано, что у нашей выборки объектов отношение размеров по большой и малой оси проплидов зависит от углового расстояния от ионизующей звезды. Балли и др. [49] не обнаружили систематической зависимости длины хвоста от расстояния θ^1 Ori C у проплидов, находящихся на расстоянии 60″. Однако авторы сами при этом отмечают, что по мере увеличения расстояния от освещающей звезды, многие хвосты плохо освещаются и некоторые видны в виде силуэтов на фоне БТО. По-видимому, здесь важным фактором является изменение физических условий в околозвездном окружении объекта с расстоянием от ионизующей звезды. Возможно, в пределах выбранного нами расстояния 16″ влияние θ^1 Ori C еще значительно, и это позволяет прослеживать ее роль в формировании хвостов проплидов. По-видимому, чем меньше расстояние от фотоионизующей звезды, тем интенсивнее происходит фотоиспарение. Это может ускорить темп диссипации околозвездного диска проплида. Следовательно, даже при одинаковом возрасте у ближайших объектов к звезде θ^1 Ori C размеры диска могут быть сравнительно меньше.

Диаметральное распределение яркости по поверхности проплидов имеет колоколообразную форму. У разных объектов распределение интенсивности проплидов имеет несимметричный характер. Характер распределения яркости по хвосту можно описывать степенной функцией с

коэффициентом $\alpha < 0$, а по малому диаметру — многочленом третей степени. Это показывает, что характер распределения вещества в околозвездном диске проплидов в указанных направлениях значительно отличается.

Нами были оценены важнейшие параметры исследуемых объектов — абсолютные звездные величины Mv и светимости Lv. Следует отметить, что эти величины определены нами по излучению ярчайшей части и не вполне могут быть отнесены к центральному объекту. Несмотря на это, полученные величины светимости сопоставимы со светимостями других проплидов в БТО (см., например, [48]).

Как отмечено выше, зависимость размеров протозвездных дисков от длины волны излучения не обнаруживается. На наш взгляд, на формирование размеров проплидов могут повлиять их масса, физическое состояние и степень эволюции пыли в диске. Известно, что оптические свойства вещества в диске молодых звезд значительно зависят от размера пылевых частиц (см., например, [53]). Последнее зависит от возраста объекта. По-видимому, более молодые объекты должны иметь меньше пыли в диске, и у таких объектов размер диска должен быть меньше в ИК-диапазоне. Одновременно сложно объяснить причину различия количества пыли в дисках проплидов, находящихся в одном звездном комплексе звездообразования.

Резюмируя результаты, полученные в настоящей работе, можно сделать следующие выводы:

1. Впервые в разных диапазонах построены изофоты распределения интенсивности по поверхности вокруг 11 ярчайших протозвездных объектов. Обнаружена значительная неоднородность в распределении излучающего вещества вокруг проплидов. Распределения яркости вдоль малой и большой осей имеют асимметричную колоколообразную форму.

2. Длина хвостов у проплидов, расположенных в пределах $16''$ от звезды θ^1 Orі C, показывает зависимость от углового расстояния до ионизующей звезды. У проплидов, расположенных ближе к ионизующей звезде, хвосты становятся короче.

3. Природа распределения вещества у протозвездного диска существенно различается: распределение яркости по сечению малого диаметра можно аппроксимировать многочленом третей степени, а по сечению большого диаметра — степенной функцией с показателем $\alpha < 0$.

4. Не обнаруживается зависимость размеров протозвездных дисков от длины волны излучения. У разных объектов в фиолетовых, красных и ближних ИК лучах размеры могут быть теми же самыми, большими или меньшими. По-видимому, это связано с физическим и эволюционным состоянием индивидуальных объектов.

5. Средние абсолютные светимости, определенные по яркой серповидной части рассматриваемых источников, незначительно отличаются от солнечной светимости.

Авторы выражают благодарность профессорам В.П. Решетникову и А.Ф. Холтыгину, а также С.С. Савченко за помощь в освоении методики поверхностной фотометрии. Выражаем благодарность также анонимным рецензентам за внимательное прочтение рукописи и конструктивные замечания, способствовавшие улучшению работы.

Работа поддерживалась грантом Фонда развития науки при Президенте АР EİF-Mob-5-2014-2(17).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. H. Warren and J. E. Hesser, Astrophys. J. Supp. **34**, 115 (1977).
2. K. M. Menten, M. J. Reid, J. Forbrich, and A. Brunthaler. Astron. And Astrophys. **474**, 515 (2007).
3. M. Cohen and L.V. Kuhi, Astrophys. J. Supp. **41**, 743 (1979).
4. П. П. Паренаго, Труды ГАИШ, МГУ, **25**, 254-с. (1954).
5. B. F. Jones and M. F. Walker, Astron. J. **95**, 1755 (1988).
6. L. A. Hillenbrand, Astron. J. **113**, 1733 (1997).
7. D. A. Allen, M. G. Burton, Nature **363**, 54 (1993).
8. M.J. McCaughrean and J.R. Stauffer, Astron. J. **108**, 1382(1994).
9. P. Laques and J.L.Vidal, Astron. and Astrophys. **73**, 97 (1979).
10. E. B. Churchwell, M. Felli, D. O. S. Wood, M. Massi, Astrophys. J. **321**, 516 (1987).
11. G. Garay, J. M. Moran, and M. J. Reid, Astrophys. J. **314**, 535 (1987).
12. J. Meaburn, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **233**, 791 (1988).
13. C. R. O'Dell, Z. Wen, and X. Hu, Astrophys. J. **410**, 696 (1993).
14. C. R. O'Dell and S. K. Wong, Astron. J. **111**, 846 (1996).
15. M. Felli, E. B. Churchwell, T. L. Wilson, and G. B. Taylor, Astron. and Astrophys. Supp. **98**, 137 (1993).
16. M. Felli, G.B. Taylor, M. Catarzi, E.B. Churchwell, S. Kurtz, Astron. and Astrophys. Supp. **101**, 127 (1993).
17. M. J. McCaughrean, Ph.D. thesis, Univ. Edinburgh (1988).
18. C. R. O'Dell and Z. Wen, Astrophys. J. **436**, 194 (1994).
19. S. M. Vicente and J. Alves, Astron. and Astrophys. **441**, 195 (2005).
20. D. E. Peterson and S. T. Megeath, in Handbook of Star Forming Regions, Volume I: The Northern Sky, ASP. Publ. 4, ed. B. Reipurth (San Francisco, CA: ASP), 590 (2008).

21. T. L. Hayward, J. R. Houck, and J. W. Miles, Astrophys. J. **433**, 157 (1994).
22. T. L. Hayward and M. J. McCaughrean, Astron. J. **113**, 346 (1997).
23. R. K. Mann, J. D. Francesco, D. Johnstone *et al.*, Astrophys. J. **784**, 82 (2014).
24. L. Ricci, M. Roberto, and D. R. Soderlom, Astron. J. 2008, 136, 2136
25. J. S. Kim, C. J. Clarke, M. Fang, and S. Facchini, Astrophys. J. Lett. **826**, 15, (2016)
26. W. J. Henney, A. Raga, S. Lizano, and S. Curiel, Astrophys. J. **463**, 216 (1996)
27. D. Johnstone, D. Hollenbach, H. Storzer, J. Bally, and R. Sutherland, Bull. Amer. Astron. Soc. **28**, 1339 (1997).
28. U. Gorti and D. Hollenbach, Astron. J. **690**, 1539 (2009).
29. W. J. Henney, C. R. O'Dell, Astron. J. **118**, 2350 (1999).
30. N. Smith, J. Bally, and J. A. Morse, Astrophys. J. Lett. **587**, L105 (2003).
31. M. Fang, R. van Boekel, R. R. King, *et al.*, Astron. and Astrophys. **539**, 119 (2012).
32. N. J. Wright, J. J. Drake, J. E. Drew, *et al.*, Astrophys. J. **746**, 21 (2012).
33. A. Breslau, M. Steinhausen, K. Vincke, and S. Pfalzner, Astron. and Astrophys. **565**, A130 (2014).
34. K. Vincke, A. Breslau, and S. Pfalzner, Astron. and Astrophys. **577**, A115 (2015).
35. F. Dai, S. Facchini, C. J. Clarke, and T. J. Haworth, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **449**, 1996 (2015).
36. D. Hollenbach, D. Johnstone, S. Lizano, and F. Shu, Astrophys. J. **428**, 654 (1994).
37. F. C. Adams, D. Hollenbach, G. Laughlin, and U. Gorti, Astrophys. J. **611**, 360 (2004).
38. C. R. O'Dell, Astron. J. **115**, 263 (1998).
39. В. П. Решетников. Поверхностная фотометрия галактик. Изд. СПбГУ, 132-стр., (2001).
40. N. Da Rio, M. Robberto, D. R. Soderblom, N. Panagia, L. A. Hillenbrand, F. Palla, and K. Stassun, Astrophys. J. Supp. **183**, 261 (2009).
41. В. Страйжис *Многоцветная фотометрия звезд* (Москлас, Вильнюс, 1977, с. 311).
42. C. R. O'Dell, D. K. Walter, and R. Dufour, Astrophys. J. **399**, L67 (1992).
43. C. R. O'Dell, F. Yusif-Zadeh, Astron. J. **120**, 382 (2000).
44. H. L. Johnson, Astrophys. J. **150**, L39 (1967).
45. R. Costero, M. Peimbert, Bol. Obs. Tonantzintla Tacubaya, **5**, 229 (1970).
46. E. J. Chaisson, M. A. Dopita, Astron. and Astrophys. **56**, 385 (1977).
47. N. Da Rio, M. Robberto, D. R. Soderblom, *et al.*, Astrophys. J. 722, 1092 (2010).
48. Da Rio, C. J. Tan, R. Kevin, *et al.*, Astrophys. J. **818**, 59 (2016).
49. J. Bally, R. S. Sutherland, D. Devine, D. Johnstone, Astron. J. **116**, 293 (1998).
50. R. Alexander, I. Pascucci, S. Andrews, P. Armitage, and L. Cieza. Protostars and Planets VI, 475 (2014).
51. U. Gorti, R. Liseau, Z. Sandor, and C. Clarke, Space Sci. Rev. **205**, 125 (2016).
52. J. Bally, R. K. Mann, J. Eisner, S. M. Andrews, *et al.*, Astrophys. J. **808**, 69 (2015).
53. A. N. Rostopchina, V. P. Grinin, A. Okazaki, *et al.*, Astron. and Astrophys. **327**, 145 (1997).