

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»

Факультет проблем физики и энергетики

Кафедра нелинейных и динамических процессов в астрофизике и геофизике

**ПОДГОТОВКА ПРОГРАММЫ НАБЛЮДЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ
МИССИИ «СПЕКТР-УФ»: ОТБОР КАНДИДАТОВ В ЗВЁЗДЫ
ТИПА Т ТЕЛЬЦА**

Выпускная квалификационная работа
(бакалаврская работа)

Направление подготовки 03.03.01 Прикладные математика и физика

Выполнила:

студентка 183 группы _____ Молярова Тамара Сергеевна

Научные руководители:

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник _____ Сачков Михаил Евгеньевич

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник _____ Торгашин Юрий Михайлович

Москва 2015

Оглавление

1	Введение	3
1.1	Цель работы	3
1.2	Изучаемая область	3
1.3	Метод поиска	4
1.4	Актуальность	5
2	T Tauri звёзды	6
2.1	Звёзды типа T Тельца	6
2.2	Спектральные особенности	7
2.3	Методы поиска	8
3	Данные	9
3.1	GALEX	9
3.2	Кросс-идентификация с 2MASS и UCAC4	10
3.3	Используемые инструменты	11
4	Отбор	12
4.1	Эталонная выборка	12
4.2	Двухцветные диаграммы	13
4.3	Критерии отбора	15
4.4	Результат и адекватность критериев	16
5	Улучшение списка	17
5.1	Удаление источников известного типа	17
5.2	Поиск галактик по собственным движениям	18
5.3	Оценка эффективных температур	18
6	Анализ	19
6.1	Диаграммы цвет-интенсивность	19
6.2	Распределение спектральной энергии	20
6.3	Оценка поглощения	20
6.4	Расположение	21

6.5 Классические и со слабыми линиями	22
7 Выводы	24
Список литературы	24

Глава 1

Введение

1.1 Цель работы

Целью данной работы является поиск звёзд, относящихся к определённому классу: звёзд типа Т Тельца (Т Tauri звёзд). Это предшественники звёзд, подобных Солнцу, а также планетарных систем. Поэтому их изучение очень важно для понимания процесса формирования Солнечной системы, её эволюции и образования планет.

Как молодые звёзды, Т Tauri обнаруживаются в областях звездообразования. Например, Т Тельца, по имени которой назван этот класс звёзд, расположена в молекулярном облаке Тельца (Taurus molecular cloud, TMC), где также находятся многие из известных Т Tauri звёзд.

Критерии поиска кандидатов относятся к ультрафиолетовой области спектра, отбор осуществляется на основе фотометрических измерений телескопа GALEX. Также используются данные в оптическом и инфракрасном диапазоне, взятые из каталогов 2MASS и UCAC4.

1.2 Изучаемая область

В данной работе изучается тёмная туманность, находящаяся в созвездиях Змея и Орёл (Serpens-Aquila Rift). Межзвёздная среда в ней находится в холодной фазе, то есть состоит из плотных и холодных облаков газа, в основном молекулярного водорода H_2 . Именно из такого вещества формируются звёзды. Существуют исследования, подтверждающие, что в этой туманности происходит активное звездообразование [1].

Расстояние до туманности оценивается по-разному. Та её часть, которая относится к созвездию Орёл, расположена на расстоянии 225 ± 55 парсек от Земли. Область, относящаяся к Змее, несколько дальше. Согласно измерениям параллакса, проведённым на радиоинтерферометре VLBA, она находится на расстоянии 415 ± 25 парсек [1].

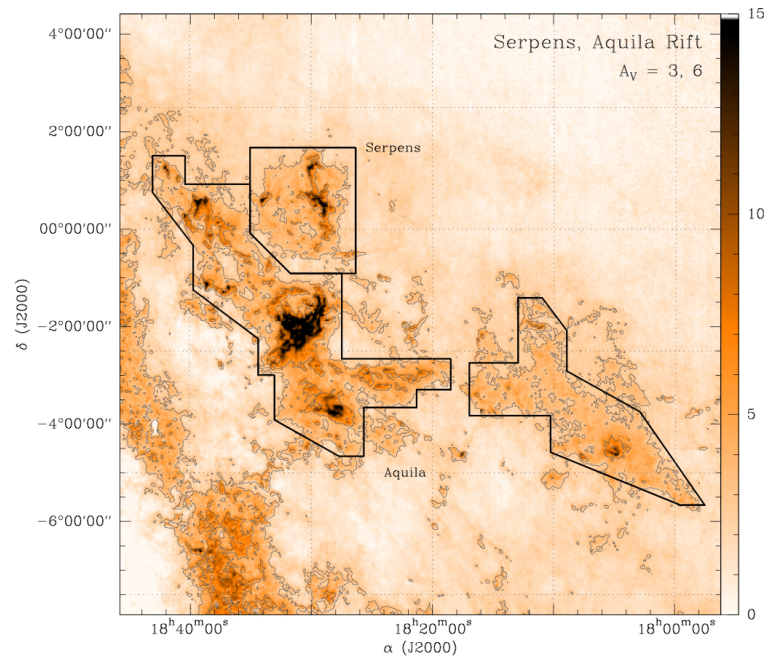


Рис. 1.1: Туманность в созвездии Змея. Карта межзвёздного поглощения в ближнем ИК, составленная С. Бонтамом на основе данных 2MASS [2]

Исследуемая область известна наличием звездообразования, в ней есть 22 звезды, идентифицированных как звёзды Т Тельца либо кандидаты в этот тип. Но в область, для которой есть наблюдения, не попала ни одна Т Тауγ звезда. Три кандидата лежат на границе области, и для них тоже нет измерений. Это может быть связано с особенностями детекторов GALEX, на краю поля зрения увеличиваются ошибки в считывании сигнала.

Мы рассматривали участок неба, для которого прямое восхождение лежит в интервале от 270 до 282.5 градусов, а наклонение – от -6 до 2 градусов. На рисунке 3.2 видно, насколько область покрыта интересующими нас наблюдениями.

1.3 Метод поиска

Т Тауγ звёзды имеют несколько характерных спектральных особенностей, а именно избыток излучения в инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазоне. Рассматриваются ИК, оптический и УФ диапазоны, но отбор осуществляется по фотометрическим данным, не требуя наличия спектров.

Алгоритм поиска аналогичен алгоритму, использовавшемуся в работе [3] для молекулярного облака Тельца.

Исследование проводится на основе ультрафиолетовых фотометрических данных космического телескопа GALEX. По ним, а также по фотометриям UCAC4 в оптическом диапазоне и 2MASS в ИК диапазоне, строятся двухцветные диаграммы. По-

ложения объектов на диаграммах сравниваются с положениями известных и подтверждённых звёзд типа Т Тельца для получения критериев отбора кандидатов.

Далее первичный список очищается от лишних источников заведомо иного типа, проводится анализ результатов и финального списка.

1.4 Актуальность

Звёзды типа Т Тельца интересны с точки зрения эволюции, как предшественники звёзд главной последовательности. Их изучение важно для понимания механизмов образования протопланетных дисков.

Т Таугі звёзды эффективно исследуются в УФ области спектра, однако диапазон 115-300 нм недоступен для наблюдений с Земли. После окончания миссии космического телескопа «Хаббл» единственным инструментом наблюдения в УФ диапазоне станет ВКО Спектр-УФ. Оснащённый тремя спектрографами, он будет способен проводить спектральные измерения слабых объектов, вплоть до 17 звёздной величины [4], что позволит подтвердить или опровергнуть принадлежность кандидатов к типу Т Таугі звёзд.

Сам по себе список кандидатов в Т Таугі звёзды нужен, чтобы определить объекты для наблюдения при дальнейшем поиске этих звёзд. Когда наблюдения проводятся космической обсерваторией и стоят дорого, важно выбрать звёзды, наиболее подходящие для изучения. И если научная задача состоит в измерении характеристик звёзд Т Тельца, наличие списка кандидатов весьма существенно.

Область молекулярных облаков в созвездии Змея пока слабо изучена в ультрафиолетовом диапазоне. Несмотря на то, что она известна как область звездообразования, в ней обнаружено совсем мало звезд типа Т Тельца, и ни одна из них не находится в изучаемой части неба.

Глава 2

T Tauri звёзды

2.1 Звёзды типа T Тельца

Звёзды типа T Тельца - это маломассивные молодые звёзды, находящиеся на пути к главной последовательности. Обычно они находятся недалеко от отражательных или тёмных туманностей, оставшихся от газопылевого облака, из которого эти звёзды сформировались. Эти звёзды находятся в той части диаграммы Герцшпрунга - Рассела, которая соответствует звёздам с массами около 2-3 солнечных. С точки зрения звёздной эволюции они находятся в стадии гравитационного сжатия и, как молодые объекты, имеют близкую к солнечной металличность [5]. Характерными чертами также является избыточная эмиссия в ИК и УФ диапазонах.

Выделяют два подтипа этих звёзд: классические звёзды типа T Тельца (classical T Tauri stars, CTTS) и звёзды типа T Тельца со слабыми линиями (weak-lined T Tauri stars). Звёзды обоих подтипов находятся на одной стадии эволюции, имеют малую массу, и их металличность близка к солнечной. Различие состоит в том, что в спектрах классических звёзд типа T Тельца присутствуют сильные эмиссионные линии, указывающие на то, что эти звёзды проявляют определённого рода активность. У звёзд типа T Тельца со слабыми линиями эмиссионные линии гораздо слабее. Граница между подтипами проводится по эквивалентной ширине линии $H\alpha$.

Физическое различие между подтипами состоит в том, что у CTTS есть аккреционный диск, а у WTTS его нет [6]. Именно наличие аккреционного диска приводит к появлению ультрафиолетового избытка: вещество, падая на звезду, разогревается до высоких температур. У WTTS вокруг звезды также может находиться диск, но он пассивен и взаимодействует со звездой только посредством излучения.

2.2 Спектральные особенности

Звёзды типа Т Тельца относятся к классу переменных звёзд. Первоначально они были выделены в отдельный класс на основе чисто спектроскопических характеристик: наличия эмиссии в линиях $H\alpha$ и Fe I, а также класс светимости IV-V.

Сейчас выделяются следующие критерии принадлежности к типу [5]:

- Наличие поблизости тёмной или отражательной туманности;
- Спектральный класс F5-M, класс светимости IV-V;
- Эмиссия в линиях H и He I, а также нейтральных и однократно ионизированных металлов;
- Сильная линия поглощения Li I 6707 Å;

Присутствие линии Li указывает на молодость звёзд, так как согласно теоретическим расчётам литий быстро выгорает.

Эмиссионный спектр CTTS напоминает спектр солнечной хромосферы. Поэтому изначально считалось, что для них характерна высокая хромосферная активность [7]. Но ожидаемое в этой модели сильное рентгеновское излучение не нашло экспериментального подтверждения.

В настоящее время считается, что спектральные особенности CTTS обусловлены наличием аккреционного диска. Если также предположить наличие магнитного поля, направление которого не совпадает с осью вращения звезды, то удаётся объяснить асимметричность эмиссионных линий. Предполагается, что они образуются на границе магнитосферы. Также аккреция вещества на звезду вызывает возникновение джетов. Это биполярные узконаправленные струи газа, истекающие со звезды. Они наблюдаются обычно в запрещённых линиях [SiI], [OI].

Наличие протопланетных дисков и магнитного поля у многих звёзд типа Т Тельца подтверждается наблюдениями.

Чтобы отличить звёзды типа Т Тельца от других, нам нужно знать характеристики их спектров, в особенности те из них, которые можно наблюдать в фотометриях. Как следствие существования аккреционного диска и истечения вещества на звезду, у TTS наблюдается избыток излучения в различных спектральных диапазонах, а именно:

- Избыток в инфракрасном диапазоне вплоть до миллиметровых длин волн, обусловленный как собственным излучением нагретого диска, так и переизлучением поглощённого им излучения звезды и джетов.
- Избыток в оптическом диапазоне – свечение плазмы, нагретой до температуры 7000-10000 К. Это так называемое вуалирование – континуальное излучение нефотосферной природы.

- Избыток в ультрафиолетовом диапазоне – свечение плазмы с температурой электронов от 10000 К до 50000 К, причём присутствует как излучение в континууме, так и различные эмиссионные линии: нейтральные атомы (H I, O I, C I), однократно (C II, Si II, Fe II, Mg II, O I) и многократно (C IV, N V, O VI) ионизованные атомы, молекулярный водород.
- Избыток в рентгеновском диапазоне, вызванный высокой активностью магнитосферы звезды, свечением короны и ударными волнами в аккреционном диске.

2.3 Методы поиска

Изначально главными критериями поиска были лишь самые основные характеристики звёзд типа Т Тельца, как-то: близость к молекулярным облакам, избыток в инфракрасном диапазоне, присутствие магнитного поля. Позже, с появлением широкомасштабных обзоров неба, стали учитываться эквивалентная ширина линии H α , собственные движения звёзд и избыток излучения в рентгеновском диапазоне.

Также могут быть использованы оптические и инфракрасные данные и распределение спектральной энергии (SED) в этих диапазонах, в которых можно выделить черты, характерные для аккреционных дисков. Однако этими методами труднее обнаружить WTTS. Единственным действительно надёжным критерием является присутствие линии Li, как показатель молодости звезды [5].

Несмотря на то, что у звёзд типа Т Тельца присутствует существенный ультрафиолетовый избыток, большинство исследований, направленных на их поиск, проводилось в инфракрасной и рентгеновской областях спектра.

К УФ диапазону относятся многие характерные особенности Т Таугі звёзд, поэтому в нём можно эффективно их изучать. С появлением обзора неба от миссии GALEX есть возможность использования и УФ области. Спектральные наблюдения в УФ осуществляются космическим телескопом Хаббл.

Глава 3

Данные

Для поиска кандидатов применялись данные, взятые из трёх каталогов точечных источников. За основу брался список всех источников, относящихся к рассматриваемой области, которые пронаблюдал телескоп GALEX. Для этого списка проводилась кросс-идентификация с каталогами 2MASS и UCAC4 с целью получения данных о звёздных величинах в фильтрах инфракрасного и видимого диапазонов.

3.1 GALEX

GALEX (Galaxy Evolution Explorer) – это ультрафиолетовый обзорный космический телескоп с полуметровым зеркалом, запущенный в 2003 году. Его целью является исследование эволюции звездообразования в галактиках от ранней вселенной до наших дней. Так как наблюдения в ультрафиолете недоступны с Земли, его каталог точечных источников является единственным источником данных в этом спектральном диапазоне.

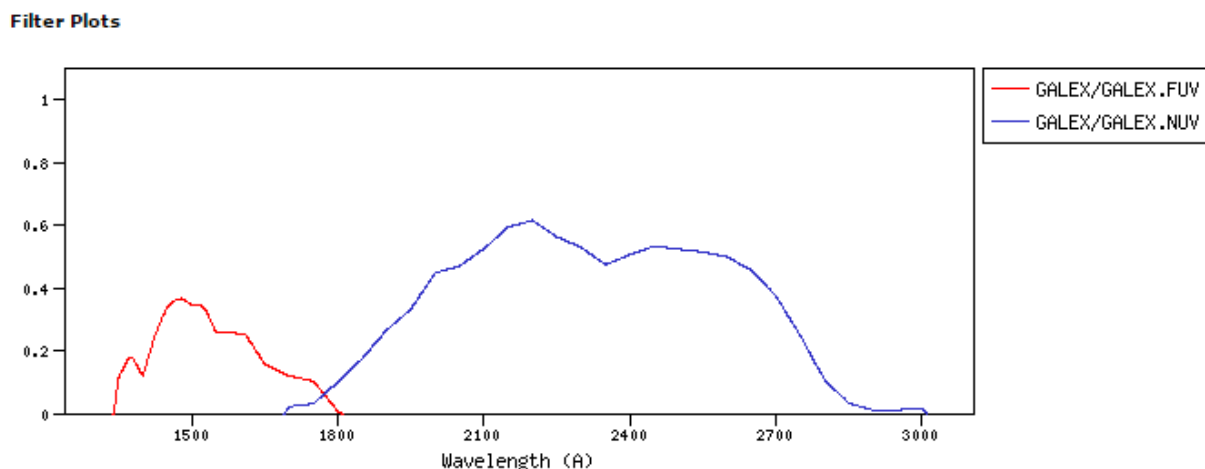


Рис. 3.1: Функции пропускания фильтров FUV и NUV космического телескопа GALEX

Обзор неба от GALEX состоит из круглых изображений радиусом 0.7 градусов и покрывает две трети небесной сферы. Наблюдения проводились в двух фильтрах: FUV(Far Ultraviolet), охватывающий диапазон 125-180 нм, и NUV(Near Ultraviolet) в диапазоне 170-300 нм с пространственным разрешением 4.3 и 5.3 угловых секунд соответственно.

Телескоп избегал наблюдений вблизи галактической плоскости и Магеллановых облаков, а также ярких звёзд, так как это могло привести к перегоранию чувствительных детекторов. Минимальная допустимая звёздная величина равна 9.5 и 8.9 для FUV и NUV соответственно. Максимальная звёздная величина составляет 22.3. Из-за высокой чувствительности телескопа в каталоге присутствует много ложных объектов, случайных шумов, которые были приняты за реальные источники. В дальнейшем эти паразитные источники отсеются при кросс-идентификации, не найдя соответствий в других спектральных диапазонах.

Так как интересующий нас участок неба находится близко к галактической плоскости, он не полностью покрыт наблюдениями, как это видно из рисунка 3.2. Информация есть только для периферии молекулярных облаков.

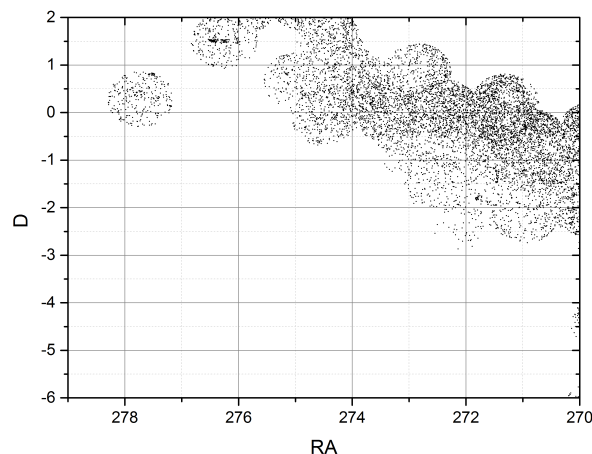


Рис. 3.2: Покрывание части изучаемой области наблюдениями телескопа GALEX

Для выбранной области нашлось 8565 источников, причём для некоторых из них отсутствовала звёздная величина в фильтре FUV.

3.2 Кросс-идентификация с 2MASS и UCAC4

После получения исходного списка источников он был кросс-идентифицирован с каталогами 2MASS и UCAC4. То есть для каждого источника из списка мы искали соответствие в другом каталоге, основываясь на равенстве или близости их координат. Параметр кросс-корреляции взят равным 3 угловым секундам. Это максимальное рас-

стояние между источниками из разных каталогов, при котором они будут считаться одним источником.

2MASS(Two Micron All-Sky Survey) – это полный обзор всего неба на длинах волн около 2 микрон. Он содержит информацию о звёздных величинах в фильтрах J, H и Ks с длинами волн 1.25, 1.65 и 2.17 мкм соответственно.

Так как этот обзор создавался с помощью больших наземных телескопов, пространственное разрешение здесь гораздо выше, чем у GALEX, и источники можно считать действительно точечными. Из-за низкой точности GALEX объекты в нём размазаны и эффективно имеют радиус около 2.2-2.7 угловых секунд. Поэтому при кросс-идентификации объект из GALEX считается совпавшим с объектом из 2MASS, если он попадает внутрь окружности с радиусом 3 угловых секунды.

Все источники из первоначального списка, не идентифицированные в каталоге 2MASS, должны быть сочтены ложными и откинута.

Каталог UCAC4 содержит данные в фильтрах видимого диапазона: V и B фотометрической системы Джонсона, а также i и g фотометрической системы SDSS. Кроме того, из него мы берём информацию о собственных движениях звёзд. В него включены только звёзды. Их величины лежат в интервале от 8 до 16, ярче, чем в GALEX. Поэтому те объекты из списка, которые не нашли соответствия в UCAC4, не должны отбрасываться.

Инфракрасные звёздные величины необходимы нам для построения диаграмм цвет-цвет и формулирования критериев поиска звёзд типа Т Тельца. Величины в видимом диапазоне используются для иллюстрации на цветовых диаграммах и для дополнительного критерия. Также они нужны для оценки эффективных температур.

После кросс-идентификации список сократился до 5932 объектов. Из них 5556 идентифицированы в UCAC4.

3.3 Используемые инструменты

База данных миссии GALEX доступна посредством CasJobs – онлайн-сервиса, позволяющего работать с астрономическими данными и получать данные из каталогов.

Данные всех используемых каталогов лежат в открытом доступе и могут быть получены с помощью сервиса VizieR [8]. Также он может осуществлять кросс-идентификацию по координатам с заданным радиусом поиска, что использовалось в данной работе.

Глава 4

Отбор

Основной этап поиска кандидатов – это отбор звёзд, соответствующих нижеизложенным критериям. Для этого необходимо наличие информации лишь о звёздной величине кандидатов в ультрафиолетовом и инфракрасном спектральных диапазонах, а спектральные данные не требуются.

При создании критериев мы будем придерживаться следующей модели. Взяв за образец выборку известных звёзд типа Т Тельца, находящихся на небольшом расстоянии, мы определим положение этих звёзд на цветовых диаграммах. Все источники, попавшие в ту же область диаграммы цвет-цвет, мы сочтём первичными кандидатами, определив условные границы этой области.

В основе данной модели составления критериев лежит работа Гомез де Кастро 2014 [3], в которой аналогичное исследование проводится для молекулярного облака Тельца.

4.1 Эталонная выборка

Чтобы определить, какого поведения мы ожидаем от кандидатов в Т Tauri звёзды, нам понадобится образцовая выборка, состоящая из известных и подтверждённых Т Tauri звёзд. Их названия и фотометрические данные приведены в 4.1.

Мы взяли звёзды, наблюдавшиеся телескопом IUE (International Ultraviolet Explorer). Выборка из 21 звезды получена в работе [9]. Далее их IUE спектры были умножены на функцию пропускания фильтров [3].

$$NUV = -2.5 \times \log \left(\frac{FluxNUV}{2.06 \times 10^{-16} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}} \right) + 20.08$$
$$FUV = -2.5 \times \log \left(\frac{FluxFUV}{1.40 \times 10^{-15} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}} \right) + 18.82$$

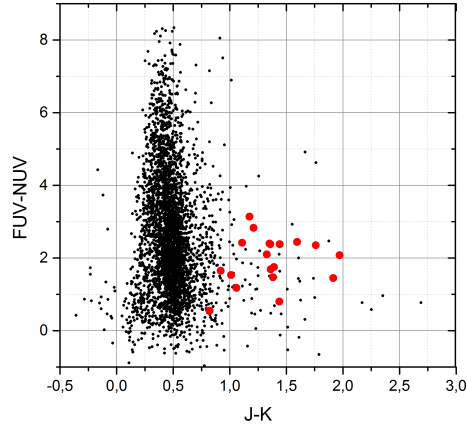
Таблица 4.1: Эталонная выборка звёзд, используемых как образец для формулирования критериев.

Star	Spectral	d	FUV	NUV	R	J	H	K
	type	pc	AB mag	AB mag	mag	mag	mag	mag
WY Ari	K5 Bin	275	17.36	15.26	12.40	10.229	9.418	8.901
BP Tau	K7	140	17.66	15.97	11.62	9.10	8.22	7.736
DE Tau	M2	140	17.96	16.49	11.93	9.18	8.273	7.799
RY Tau	K1	140	17.73	15.38	9.67	7.16	6.13	5.395
T Tau	K0	140	16.42	14.97	9.80	7.24	6.237	5.325
DF Tau	M0-1	140	17.58	16.78	11.50	8.17	7.256	6.734
DR Tau	K4	140	16.95	14.87	12.19	8.85	7.8	6.874
GM Aur	K3	140	17.57	16.39	11.22	9.34	8.603	8.283
SU Aur	G2	140	18.04	15.21	9.17	7.20	6.558	5.99
RW Aur	K1	140	16.51	14.13	9.95	8.38	7.621	7.02
GW Ori	G5	450	17.44	15.02	9.52	7.70	7.103	6.59
CV Cha	G8	175	17.32	14.94	10.51	8.29	7.46	6.845
RU Lup	K7	140	15.85	13.41	9.99	8.73	7.824	7.138
AK Sco	F5 SB	145	17.15	14.01	9.20	7.68	7.06	6.503
DI Cep	G8	244	17.51	15.11	10.49	9.30	8.572	7.952
HD 283572	G5	140	18.75	14.77	9.14	7.41	7.008	6.869
AB Dor	K0	15	16.32	12.8	6.50	5.32	4.845	4.686
TW Hya	K7	56	15.65	14	10.19	8.22	7.558	7.297
V2398 Oph	G8	125	16.23	14.48	10.10	8.62	7.81	7.23
V4046 Sgr	K5.6 SB	83	16.6	16.05	9.67	8.07	7.435	7.249
FK Ser	K7 Bin	350	17.72	16.19	9.41	7.64	6.92	6.624

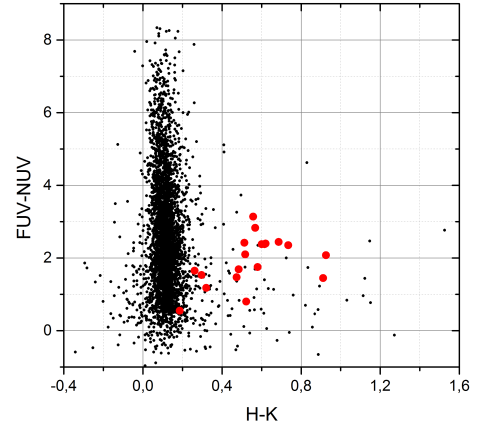
В эталонной выборке содержится мало WTTS и звёзд М типа, что обусловлено низкой чувствительностью телескопа IUE. Можно заметить, что в FUV звёздная величина мала, это делает более трудным поиск звёзд типа Т Тельца со слабыми линиями.

4.2 Двухцветные диаграммы

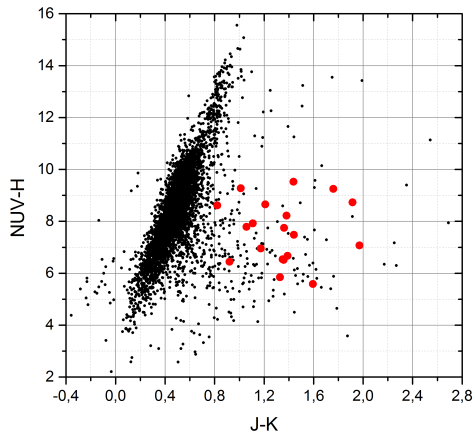
Перейдём к построению двухцветных диаграмм. Мы используем четыре типа этих диаграмм: FUV-NUV vs J-K, FUV-NUV vs H-K, NUV-H vs J-K и NUV-R vs J-K. Первые три существенны для отделения кандидатов, четвёртый же выполняет иллюстративную функцию, так как на диаграмму этого типа, требующую наличия блеска в фильтре R, попадает гораздо меньше звёзд.



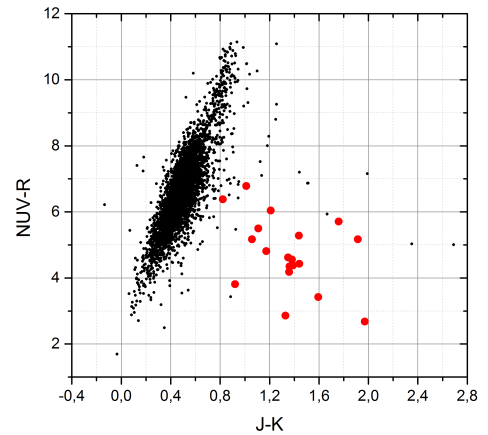
FUV-NUV vs J-K



FUV-NUV vs H-K



NUV-H vs J-K



NUV-R vs J-K

Рис. 4.1: Двухцветные диаграммы. Красным отмечены звёзды эталонной выборки

Можно объяснить, почему для анализа выбраны именно диаграммы цвет-цвет. Потому что мы не можем сравнивать блеск разных звёзд, он зависит не только от типа звезды, но и от расстояния, поглощения. Нам нужно учесть избыток в инфракрасном диапазоне, поэтому по одной из осей откладывается разность двух ИК звёздных величин. Цвет по другой оси включает УФ величину.

На самом деле в работе [3] приводятся все типы диаграмм, которые мы можем построить, имея исходные данные. Однако именно на выбранных четырёх диаграммах звёзды типа Т Тельца лежат обособленно от остальных, как это видно из положения эталонной выборки.

Звёзды эталонной выборки выделены красным. Заметно, что они группируются в стороне от основной массы звёзд, относящихся к главной последовательности. Также можно видеть, что довольно много звёзд находятся в той же области диаграммы, что и эталоны.

На четвёртом графике рисунка 4.1 рядом с выборкой Т Таври звёзд почти нет других источников. Это связано с тем, что использующийся в данной диаграмме блеск в

фильтре R измерен лишь для немногих звёзд в данной области – тех, что присутствуют в каталоге UCAC4.

4.3 Критерии отбора

В выборку включим все звёзды, положение которых на диаграммах близко к положению известных Т Tauri. Для этого зададим границы, в которые должны входить цвета, причём все эталонные звёзды также должны попадать в эти границы.

На диаграмме NUV-H vs J-K эталонные Т Tauri особенно сильно отделены от остальных звёзд. Это обусловлено тем, что в выборку IUE входят в основном яркие звёзды. К тому же большинство из них находится ближе, и как следствие меньше подвержено поглощению. Ниже группы эталонных звёзд на этой диаграмме находится много точек, у которых NUV-H меньше. Предполагая, что эти источники подверглись большему поглощению, то есть находятся глубже в молекулярном облаке, мы также включим их в список кандидатов, сдвинув границы по NUV-H в нижнюю сторону.

Диаграмма NUV-R vs J-K должна дать нам не очень много кандидатов, однако её тоже нужно учесть. Как и NUV-H vs J-K, она даёт шанс неярким звёздам с неизмеренным FUV попасть в список кандидатов.

Теперь мы можем сформулировать критерии первичного отбора кандидатов:

- FUV-NUV vs J-K: звёзды типа Т Тельца должны удовлетворять $0.8 < J - K < 2.4$ и $0.4 < FUV - NUV < 4.6$;
- FUV-NUV vs H-K: звёзды типа Т Тельца должны удовлетворять $0.25 < H - K < 1.2$ и $0.4 < FUV - NUV < 4.6$;
- NUV-H vs J-K: звёзды типа Т Тельца должны удовлетворять $0.8 < J - K < 2.4$ и $5.0 < NUV - H < 10.0$;
- NUV-R vs J-K: звёзды типа Т Тельца должны удовлетворять $0.8 < J - K < 2.4$ и $1.5 < NUV - R < 7$;

Наша цель – не только найти кандидаты в Т Tauri звёзды, мы хотим, чтобы ни одна из них не была потеряна в ходе отбора, если это возможно. Поэтому на этом этапе мы оставляем те источники, которые удовлетворяют хотя бы одному из четырёх критериев.

Первые два критерия – основные. Звёздные величины и цвета, входящие в них, соответствуют спектральным особенностям Т Tauri звёзд, отличающих их от звёзд главной последовательности. Третий и четвёртый критерий тоже учитывают ультрафиолетовый избыток, так как в фильтр NUV попадают многие ключевые эмиссионные линии. Однако они подходят и для более слабых звёзд: тех, что находятся глубже в

молекулярном облаке, чьё более коротковолновое излучение не дошло до нас из-за поглощения; для звёзд типа Т Тельца со слабыми линиями, у которых избыток настолько слаб, что не был зафиксирован детекторами GALEX.

4.4 Результат и адекватность критериев

После применения этих критериев к исходному списку мы получили следующие результаты.

Первому и второму критериям удовлетворяют 170 источников, третьему – 152, и четвёртому 94. В общий в список, включающий объединение этих четырёх, попало 256 источников.

Следует отметить, что последний критерий добавляет лишь 4 источника в объединённый список, то есть кандидатов, удовлетворяющих одному лишь четвёртому критерию, всего 4, скорее всего, они лежат близко к главной последовательности. Первые два критерия (основные) в сумме дают 170 источников. Оставшиеся 82 кандидата попали в список по третьему критерию. Они могут не иметь FUV блеска.

Эффективность этих критериев может быть проверена по их способности детектировать все известные в изучаемой области звёзды типа Т Тельца. Но в туманности в созвездии Змея нет ни одной звезды, классифицированной как Т Таугі, и ни одной, классифицированной как кандидат в Т Таугі звёзды. Поэтому мы не можем проверить это напрямую.

Однако в работе [3], в которой аналогичные критерии применялись к звёздам в молекулярном облаке Тельца, эффективность критериев была проверена. Они оказались способны обнаружить все известные в ТМС Т Таугі звёзды, которых там насчитывается 31. Их критерии включают более широкие рамки по J-K. Для нашей области исследования рамки были сдвинуты влево, так как главная последовательность под действием, по-видимому, поглощения, смещена ближе к эталонным звёздам, что затрудняет дифференциацию кандидатов.

Глава 5

Улучшение списка

Теперь мы очистим список от источников, который могли попасть туда случайно. Это могут быть галактики, например, или горячие звёзды, потому что у них тоже присутствует избыток ультрафиолета.

5.1 Удаление источников известного типа

В первую очередь нужно очистить список от источников, которые заведомо не являются звёздами типа Т Тельца. Это могут быть галактики или звёзды, отношение которых к какому-то иному типу уже установлено.

С помощью сервиса Simbad можно узнать, чем является интересующий нас источник, имея лишь его координаты. Simbad (Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data) – это база данных об астрономических объектах, лежащих вне Солнечной системы [10]. Таким образом, загрузив в неё список координат возможных кандидатов, мы можем узнать их тип, если он когда-либо и кем-либо был определён.

Из 256 источников нашего списка Simbad идентифицировал лишь 43. У всех них обнаружен избыток инфракрасного излучения, что согласуется с характеристиками звёзд Т Тельца. В списке есть звёзды определённого спектрального класса: шесть звёзд класса К5, три К2, одна М0 и одна G.

Некоторые идентифицированные источники не могут быть Т Таугі звёздами. Это звёзды класса А и гиганты, их нашлось 4. Один из источников является галактикой. Все они должны быть выброшены из списка кандидатов.

Остальные источники не идентифицированы вовсе, то есть могут являться любым объектом. Они должны быть оставлены в списке.

5.2 Поиск галактик по собственным движениям

Многие неидентифицированные Simbad источники могут также быть галактиками. Чтобы избавиться от них, мы можем сравнить их собственные движения. Те объекты, чьи собственные движения очень малы, то есть лежат в пределах погрешности наблюдений, с высокой вероятности лежат вне нашей Галактики.

Чтобы определить собственные движения, нужно заснять интересующую нас область и сравнить положения объектов с положениями, зафиксированными более ранними наблюдениями. Это может быть каталог DSS, который составлен на основе наблюдений, проведённых более 50 лет назад.

К сожалению, нам не удалось найти свежих фотографий неба в нужной области. В каталоге UCAC4 содержится информация о собственных движениях, но в него входят только объекты, заведомо являющиеся звёздами, поэтому он не может нам помочь.

5.3 Оценка эффективных температур

Некоторые попавшие в список источники могут иметь ультрафиолетовый избыток просто потому что у них очень большая температура.

Для оценки эффективной температуры использовалась виртуальная обсерватория VOSA (Virtual Observatory SED Analyzer) [11]. Она позволяет построить распределение спектральной энергии (spectral energy distribution, SED) для источника, звёздные величины которого загружены пользователем, а также найти другую фотометрическую информацию об источнике с указанными координатами.

С помощью SED сервис может оценить чернотельную температуру источников, зная также расстояние до него и величину поглощения A_v . Расстояние до области нам известно, оно равно 415 пк [1]. Поглощение, по оценкам, данным в работах [3] и [1], не превышает 0.3-0.5. Для оценки бралась величина $A_v = 0.3$.

Согласно полученным оценкам, температуры кандидатов лежат в диапазоне от 3000 К до 9000 К. Отбросив все источники горячее 7000 К, сократим список ещё на 12 строк. После этого этапа в списке остаётся 239 кандидатов.

Глава 6

Анализ

6.1 Диаграммы цвет-интенсивность

Если построить диаграмму цвет-интенсивность 6.1, то можно увидеть, насколько отличается блеск кандидатов от блеска остальных источников в области и от эталонной выборки. Видно, что звёзды выборки гораздо ярче как кандидатов, так и всех звёзд области. Это обусловлено тем, что они находятся в молекулярном облаке Тельца, которое расположено вдвое ближе.

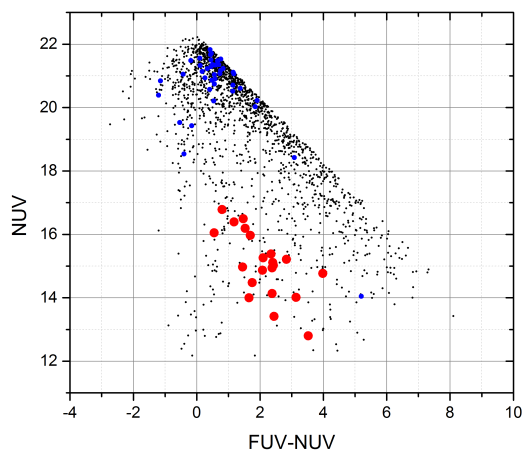


Рис. 6.1: Диаграмма цвет-интенсивность. Красным отмечены звёзды эталонной выборки, синим – отобранные кандидаты, чёрным – звёзды поля.

Большинство кандидатов очень слабые, их звёздные величины находятся на грани чувствительности GALEX. Также видно, что цвет FUV-NUV у кандидатов может быть отрицательным, и также просто отличаться от эталонных. Это даёт представление о количестве кандидатов, пришедших в выборку с третьим, неультрафиолетовым критерием.

Также видно, что выбранные нами кандидаты несколько краснее, чем эталонные. Этот эффект может быть связан как с межзвёздным покраснением, так и с тем, что среди наших кандидатов меньше классических, более голубых Т Tauri звёзд.

Звёзд поля на рисунке 6.1 меньше, чем действительно есть в области, так как многие из них не имеют FUV измерений.

6.2 Распределение спектральной энергии

Сервис VOSA, использовавшийся для оценки эффективных температур, может строить распределение спектральной энергии, SED. Мы можем построить такую характеристику для эталонных звёзд, например, для Т Тау, которая также входит в этот список, и сравнить с ней SED кандидатов.

Как видно из рисунка, распределения не всегда похожи. Иногда избыток ультрафиолета заметно больше. Однако у большинства кандидатов в ультрафиолетовом диапазоне присутствует пик, подобный пику у Т Тау.

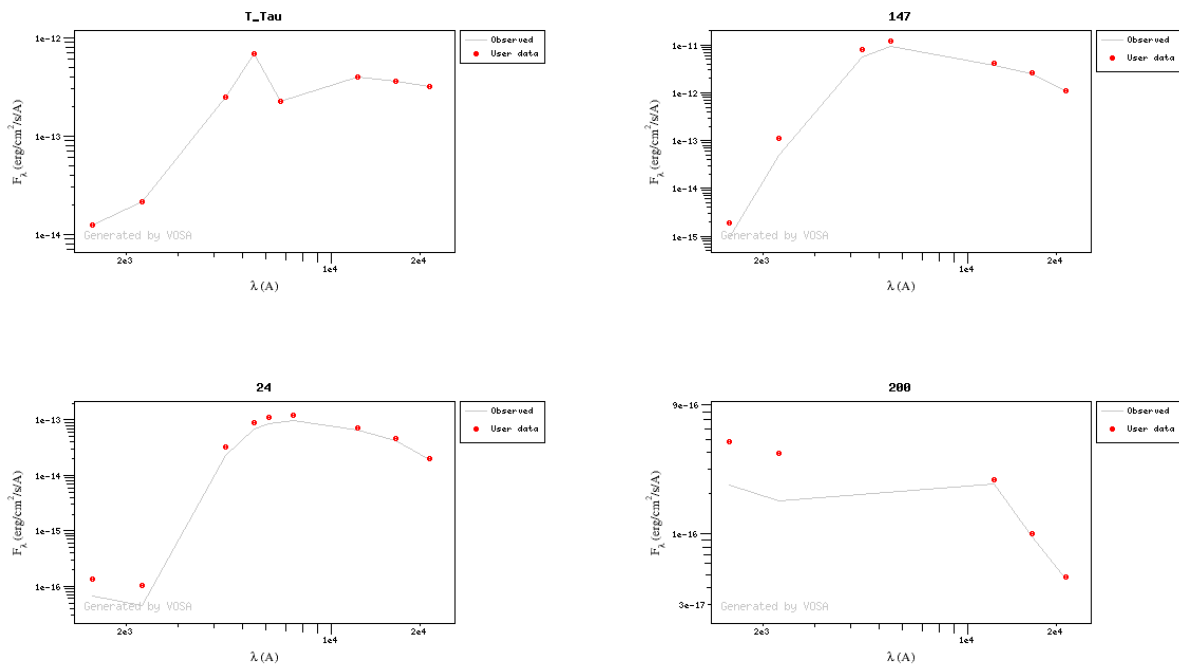


Рис. 6.2: Распределение спектральной энергии (SED) для Т Тау (1-ый график) и некоторых из кандидатов

6.3 Оценка поглощения

Межзвёздное поглощение в исследуемой области определяется в основном наличием молекулярных облаков. Так как ультрафиолет подвергается более сильному поглощению, чем ИК излучение, каталог GALEX содержит очень мало объектов в изучаемой

части неба. Так как для звёзд Т Тельца характерен избыток УФ излучения, их видно значительно лучше, чем звёзды главной последовательности. Это может объяснить тот факт, что больше четверти первоначальных объектов попали в итоговый список кандидатов.

Наблюдения миссии GALEX относятся только к периферии облаков, где поглощение значительно ниже. По некоторым оценкам, его величина $A_v < 0.5$ [3] по другим $A_v < 0.5$ [1], и таким поглощением можно пренебречь.

Значение $A_v = 0.3$ использовалось для оценки эффективных температур. Также оно учитывалось при построении SED. Но существенного влияния по сравнению с $A_v = 0$ замечено не было.

6.4 Расположение

На рисунке 6.3 видно, как расположены найденные кандидаты в исследуемой области. Заметно, что их больше в областях менее плотного газа, которые отличаются большей плотностью источников ультрафиолета. Однако кандидаты есть и там, где плотность источников заметно ниже. В участках, близких к центру облака, кандидатов в звёзды типа Т тельца не обнаружено.

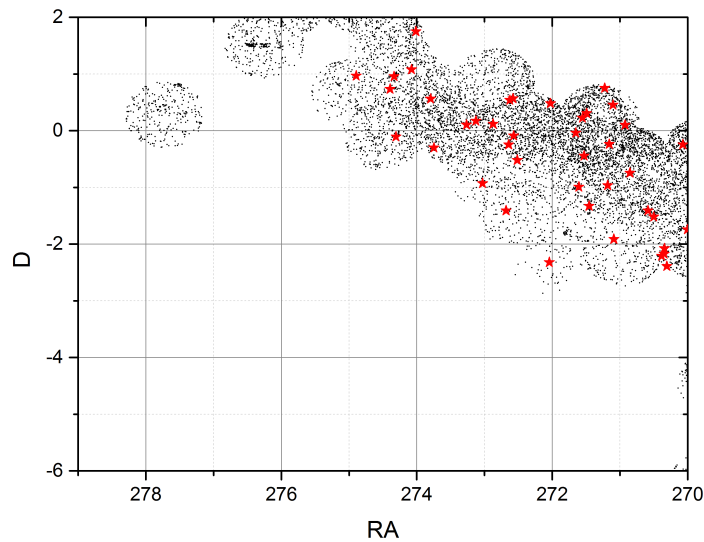


Рис. 6.3: Расположение лучших кандидатов в исследуемой области. Чёрными точками обозначены звёзды поля, красными значками – найденные кандидаты в Т Tauri.

6.5 Классические и со слабыми линиями

Теперь разделим итоговый список кандидатов на Т Тельца со слабыми линиями и классические Т Тельца.

В итоговом списке из 239 объектов очень многие не имеют измерений в FUV. Есть такие, у которых FUV есть, но она заметно больше 22.3 звёздной величины – предела чувствительности GALEX при заданном времени выдержки. Эти слабые и, возможно, недостоверные источники мы отнесём к WTTS, которые могут не иметь УФ избытка. Вычеркнем их из основного списка, не забывая, впрочем, что они также являются кандидатами в Т Таугі звёзды.

После этого в списке осталась 41 звезда. Одна из них, HR 6757, в Simbad обозначена как звезда класса G8.

В аналогичном исследовании [3] на основе выборки известных в ТМС звёзд Т Тельца со слабыми линиями были созданы критерии, позволяющие разделить WTTS и CTTS. Они находятся в разных областях двухцветной диаграммы FUV-NUV vs J-K:

- Положение WTTS определяется линией $FUV - NUV = -(3.88 \pm 0.61)(J - K) + (5.64 \pm 0.55)$, среднеквадратичное отклонение равно 0.59.
- CTTS имеют нормальное распределение по оси $J - K$ со средним значением $a = 1.4$ и дисперсией $\sigma = 0.4$. По оси $FUV - NUV$ они распределены равномерно.

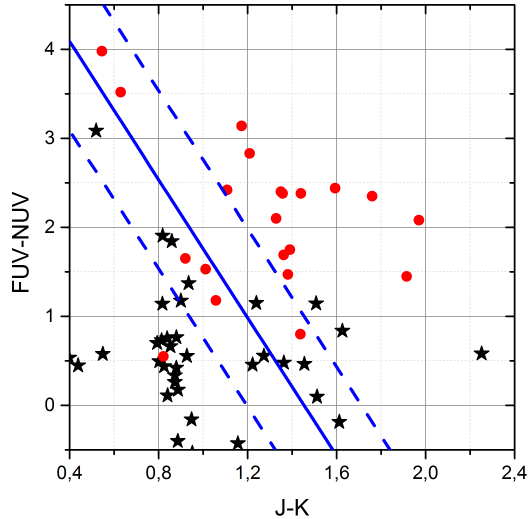


Рис. 6.4: Двухцветная диаграмма FUV - NUV vs J - K. Красным обозначены звёзды эталонной выборки, чёрным – кандидаты. Синими прямыми выделена область, в которой расположены WTTS.

Теперь можно распределить кандидаты в группы согласно этим результатам. К звёздам типа Т Тельца со слабыми линиями относим те, что лежат между штриховыми

прямыми на рисунке 6.4, и имеют $FUV - NUV > 3.5$. К классическим Т Таугі отнесём источники, у которых $0 < FUV - NUV < 3.5$. Остальные будем считать кандидатами в Т Таугі звёзды без более детальной классификации.

Из итогового списка 13 кандидатов попали в число WTTS, 22 – CTTS, 6 не классифицированы.

Глава 7

Выводы

В данной работе получены критерии, позволяющие отделять кандидатов в звёзды типа Т Тельца от остальных звёзд в области. Критерии, основанные на фотометрических данных каталогов GALEX, 2MASS и UCAC4, берут за основу положение известных и подтверждённых Т Таугі звёзд.

Получен список из 41 кандидата в звёзды типа Т Тельца, включающий 13 кандидатов в Т Тельца со слабыми линиями и 22 – в классические. Они подходят для дальнейшего изучения, в частности, для наблюдения на космическом телескопе Спектр-УФ после его запуска. 198 кандидатов со слабыми или неподтверждёнными УФ фотометриями отнесены к WTTS.

Также есть пути дальнейшего улучшения списка: учёт межзвёздного покраснения с помощью анализа двухцветной диаграммы $U - B$ vs $B - V$; учёт собственных движений и отсева галактик; наблюдение кандидатов с земли.

Список литературы

1. S.-J. Park, K.-W. Min, K.-I. Seon, W. Han, D.-H. Lee, and J. Edelstein, “Far-ultraviolet observation of the aquila rift with fims/spear,” *The Astrophysical Journal*, vol. 754, no. 1, p. 10, 2012.
2. P. André and P. Saraceno, “Probing the origin of the stellar initial mass function: A wide-field herschel photometric survey of nearby star-forming cloud complexes proposal for a spire/pacs gt key project submitted by: Spire sag 3, cea saclay, ifsi rome & inaf-arcetri, ku leuven, mpia heidelberg, and the herschel science centre,” 2007.
3. A. I. Gómez de Castro, J. Lopez-Santiago, F. López-Martínez, N. Sánchez, P. Sestito, E. De Castro, M. Cornide, and J. Y. Gestoso, “A galex based search for the sparse young stellar population in the taurus-aurigae star forming region,” *arXiv preprint arXiv:1412.3002*, 2014.
4. O. Malkov, M. Sachkov, B. Shustov, P. Kaigorodov, F. J. Yáñez, and A. I. G. De Castro, “Scientific program construction principles and time allocation scheme for the world space observatory—ultraviolet mission,” *Astrophysics and space science*, vol. 335, no. 1, pp. 323–327, 2011.
5. . . Додин, “Определение физических условий в аккреционных пятнах звезд типа тельца на основе анализа их спектров,” Ph.D. dissertation, МГУ им. МВ Ломоносова, Гос. астрон. ин-т им. ПК Штернберга М., 2013.
6. P. Petrov, “T tauri stars,” *Astrophysics*, vol. 46, no. 4, pp. 506–529, 2003.
7. . . Кравцова, “Анализ ультрафиолетовых спектров звезд типа Т Тельца,” Ph.D. dissertation, МГУ им. МВ Ломоносова, Гос. астрон. ин-т им. ПК Штернберга М., 2004.
8. F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marout, “The vizier database of astronomical catalogues,” *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 143, no. 1, pp. 23–32, 2000.

9. A. I. Gómez de Castro and M. Franqueira, “Accretion and uv variability in bp tauri,” *The Astrophysical Journal*, vol. 482, no. 1, p. 465, 1997.
10. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, P. Dubois, F. Bonnarel, S. Borde, F. Genova, G. Jasiewicz, S. Laloë, S. Lesteven *et al.*, “The simbad astronomical database-the cds reference database for astronomical objects,” *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 143, no. 1, pp. 9–22, 2000.
11. A. Bayo, C. Rodrigo, D. B. y Navascués, E. Solano, R. Gutiérrez, M. Morales-Calderón, and F. Allard, “Vosa: virtual observatory sed analyzer-an application to the collinder 69 open cluster,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 492, no. 1, pp. 277–287, 2008.