

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Научно-квалификационная работа (диссертация)

Ярчайшие звёзды за пределами Местной группы галактик

Соловьева Юлия Николаевна

Научный руководитель:
г. н. с., д. ф.-м. н, профессор

Фабрика Сергей Николаевич

Нижний Архыз – 2020

Структура работы

- Введение
- Глава 1. Яркие голубые переменные и другие звёзды высокой светимости
- Глава 2. Наблюдения и обработка данных
- Глава 3. Новая LBV-звезда и два новых LBV кандидата в галактике NGC 4736
- Глава 4. Два новых LBV кандидата в галактике NGC 247
- Заключение

Введение

- **Цель** – поиск ярчайших массивных звёзд за пределами Местной группы галактик
- **Задачи:**
 - 1) На основе спектроскопических данных, полученных в рамках наблюдательной программы "Массивные звёзды в близких галактиках"(заявитель С.Н. Фабрика) отобрать эмиссионные объекты – кандидаты в массивные звёзды в близких галактиках;
 - 2) По архивным оптическим данным космического телескопа имени Хаббла (HST) и наземных телескопов выполнить фотометрические измерения наиболее перспективных кандидатов;
 - 3) Получение новых спектроскопических (БТА САО РАН) и фотометрических данных (Цейсс-1000), а так же их обработка для отобранных кандидатов;
 - 4) Выполнить ИК-фотометрию (Spitzer и HST) выделенных кандидатов с целью поиска и исследования их пылевых оболочек;
 - 5) Оценить значения межзвёздного поглощения по наблюдаемым спектрам окружающих объекты туманностей;
 - 6) Оценить некоторые фундаментальные параметры отобранных кандидатов.

Актуальность исследования обусловлена малым количеством известных LBV звёзд за пределами Местной группы галактик.

Глава 1. Яркие голубые переменные и другие звёзды высокой светимости

- **Яркие голубые переменные (LBVs)** - это ярчайшие ($> 10^5 L_{\text{sun}}$) массивные ($M \geq 25 M_{\text{sun}}$), проэволюционировавшие звёзды, для которых характерна значительная спектральная и фотометрическая переменность на различных временных масштабах;
- **Методы поиска:** по фотометрической переменности, ИК-данные, H α -излучение голубых звёзд, и т. д.;
- **Эволюционный статус:** LBV - перехода от массивных звезд O-типа к звездам типа Вольфа-Райе, LBV — результат эволюции тесных двойных систем;
- **Причины LBV-феномена:** ϵ -к- механизмы, сверхзвуковая турбулентность в фотосфере, субфотосферные динамические неустойчивости, близость к пределу Эддингтона (давление излучения);
- **Импосторы сверхновых;**
- **Другие типы массивных звёзд:** B[e]-сверхгиганты, тёплые гипергиганты, Of/late-WN и др.

Глава 2. Наблюдения и обработка данных

- **БТА/SCORPIO**: гризмы VPHG1200G, VPHG1200R, VPHG1200B;
- **SALT/RSS**: решётка PG0900, спектральный диапазон 4300-7400 Å, разрешение 5.3 Å;
- **Subaru/FOCAS**: гризма 300 В, спектральный диапазон 3650-8300 Å, разрешение 5 Å.

Обработка спектральных данных:

- Удаление следов космических частиц;
- Вычитание тока смещения матрицы (bias);
- Учёт плоского поля (flat);
- Калибровка по длинам волн;
- Учёт атмосферной экстинкции;
- Экстракция одномерных спектров;
- Переход к абсолютным потокам;

Глава 3. Новая LBV-звезда и два новых LBV кандидата в галактике NGC 4736

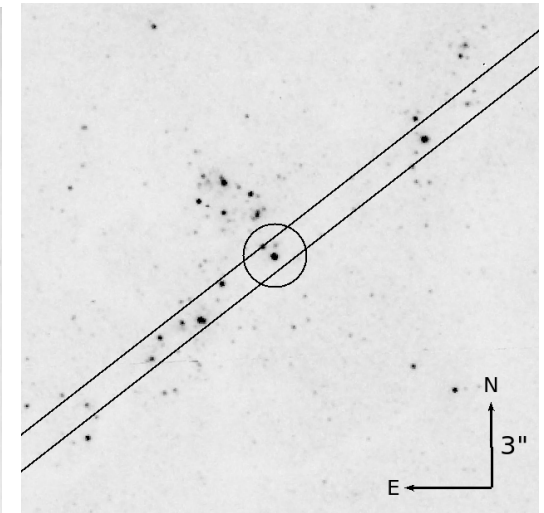
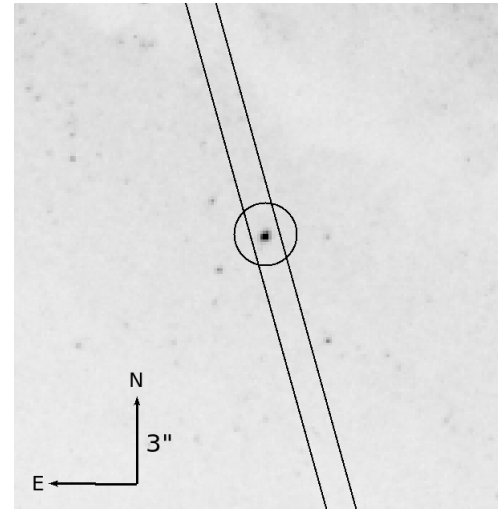
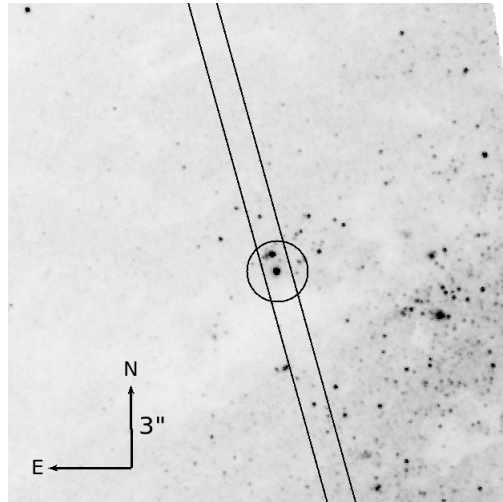
NGC 4736:
D=4.59 Мпк

NGC4736_1

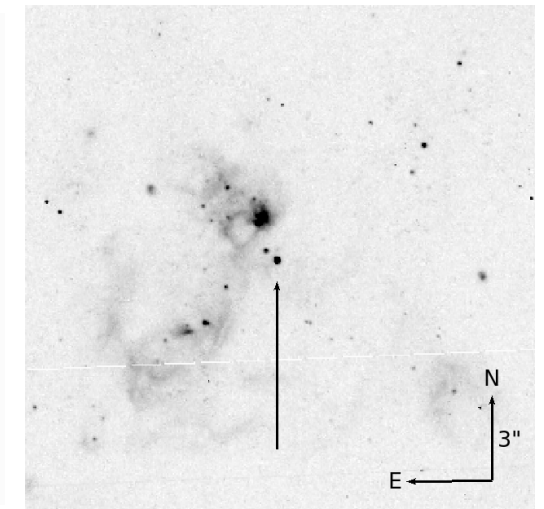
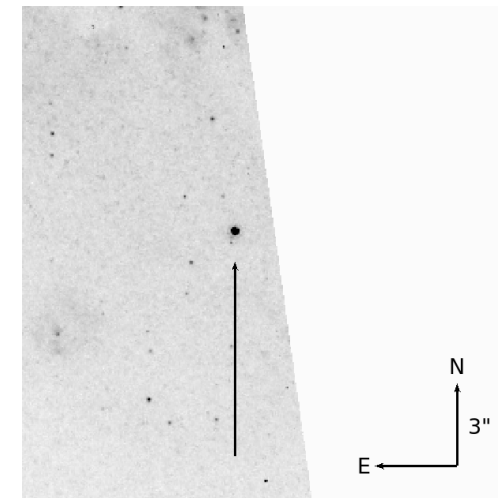
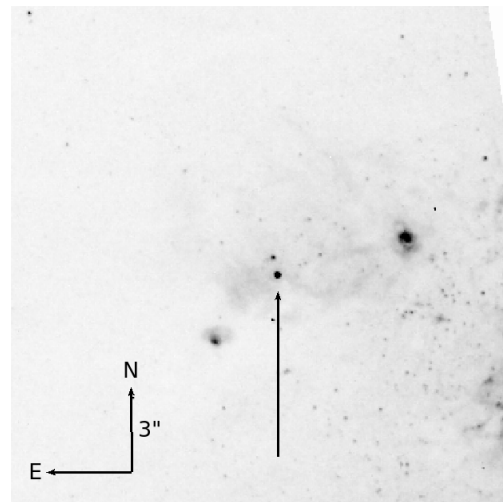
NGC4736_2

NGC4736_3

ACS/WFC/F555W



ACS/WFC/F658N



3.1 Наблюдения

Журнал спектроскопических наблюдений кандидатов из галактики NGC 4736 на телескопе БТА/SCORPIO. Приведены даты наблюдений, используемая при наблюдениях гризма, количество и время экспозиций, размер звёздного изображения β .

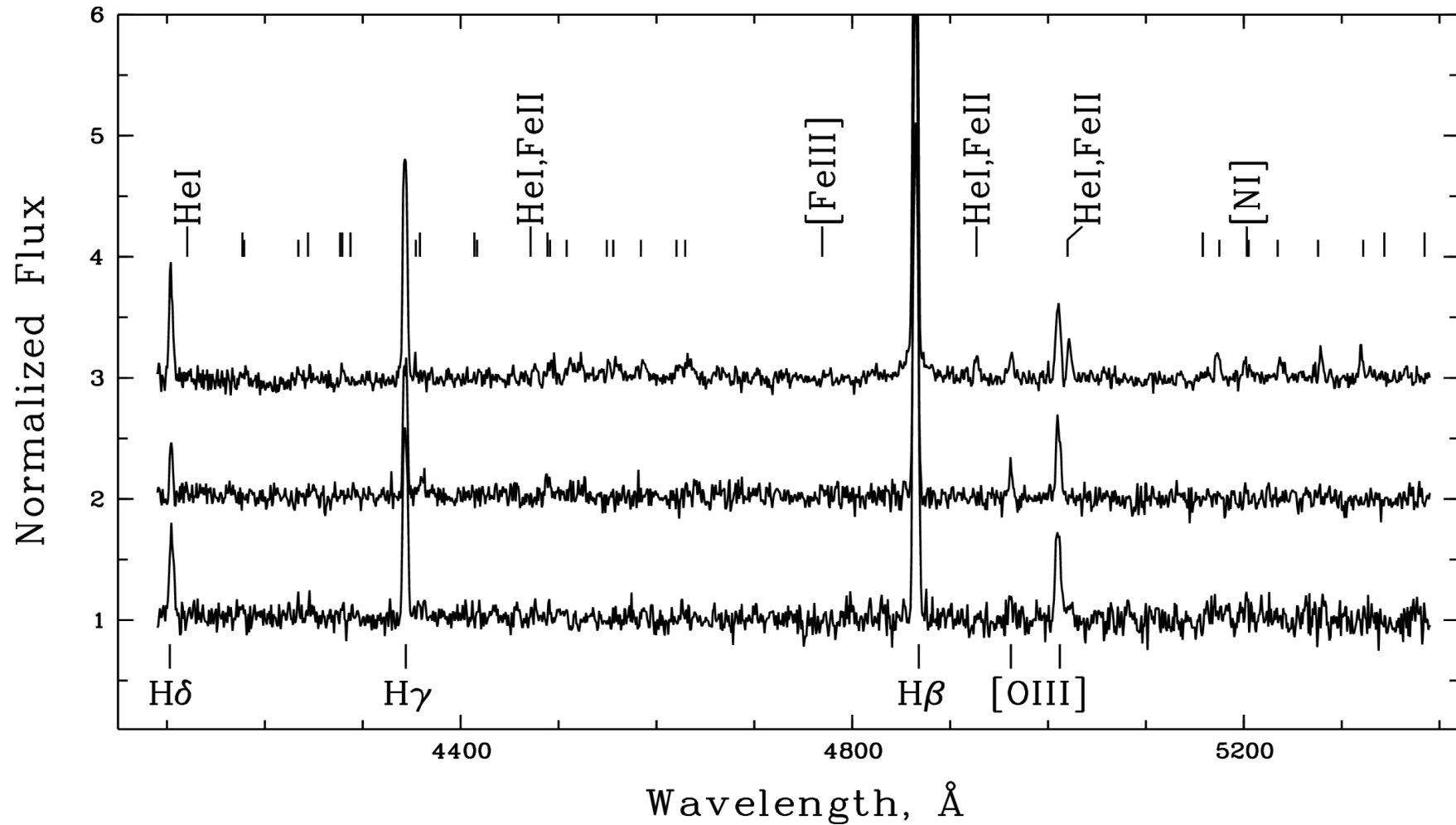
Объект	Дата	Гризма	t_{exp}, s	$\beta, ''$
NGC 4736 _ 1	2014/01/03	VPHG1200R	600×2	1.0
	2015/01/18	VPHG1200G	1200×2	1.2
	2018/02/18	VPHG1200G	900×2	1.0
	2020/01/18	VPHG1200B	900×1	1.1
NGC 4736 _ 2	2014/01/03	VPHG1200R	600×2	1.0
	2015/01/18	VPHG1200G	1200×2	1.2
	2018/02/18	VPHG1200G	900×2	1.0
NGC 4736 _ 3	2014/01/03	VPHG1200R	600×2	1.0
	2017/03/31	VPHG1200G	600×4	1.3

3.1 Наблюдения

Журнал фотометрических данных. Столбцы содержат названия телескопов, даты наблюдений и звёздные величины в системе Джонсона-Козинса. В последних трех столбцах даны звёздные величины объектов NGC 4736_1, NGC 4736_2, NGC 4736_3 в полосах В и V (задаются через косую черту)

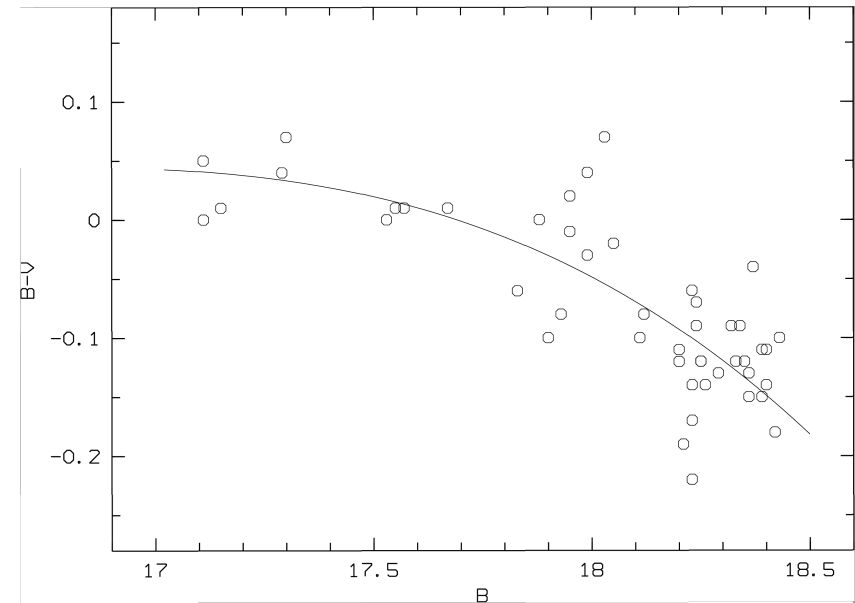
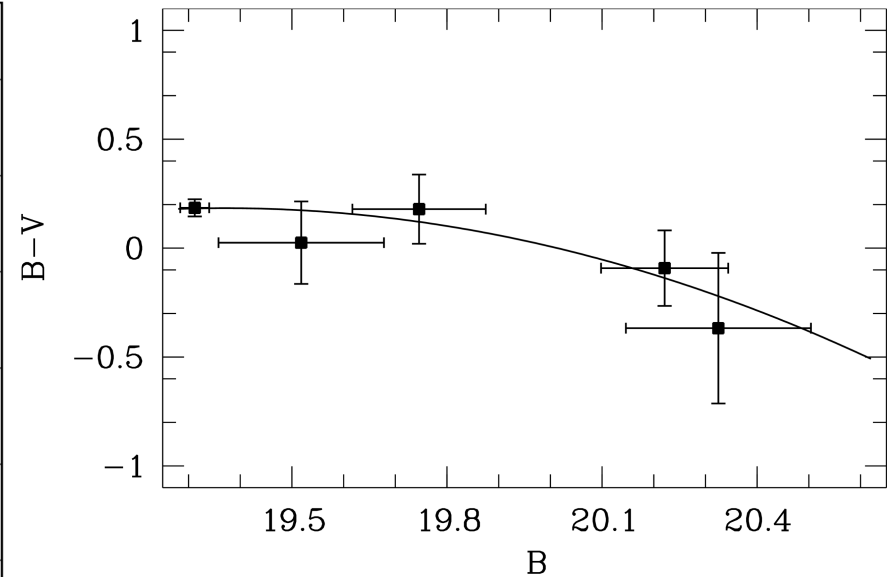
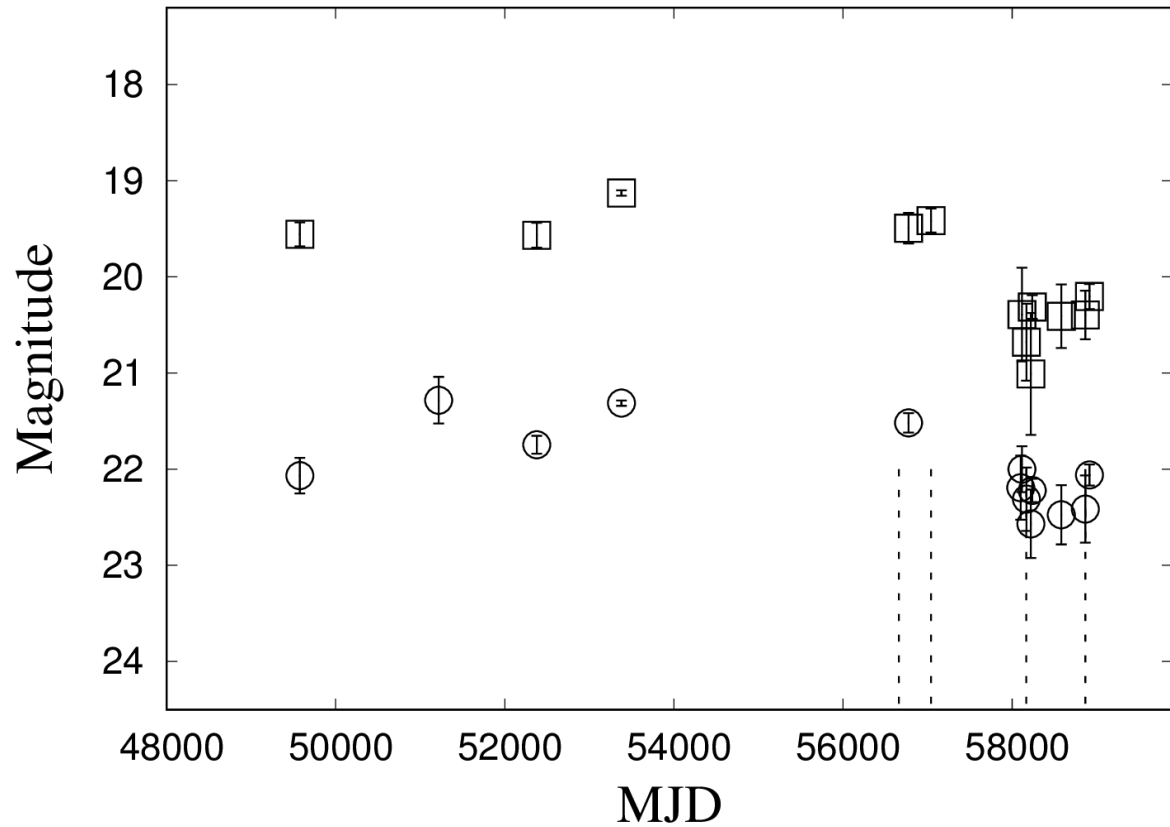
Telescope	Date	B/V magnitude		
		NGC 4736_1	NGC 4736_2	NGC 4736_3
JKT	1994-08-12	20.07 ± 0.19/19.56 ± 0.12	20.05 ± 0.11/19.95 ± 0.10	-/-
Palomar 60 inch	1999-02-08	19.28 ± 0.24/-	-/-	-/-
KPNO 2.1m	2002-04-14	19.75 ± 0.09/19.57 ± 0.13	20.05 ± 0.05/19.99 ± 0.07	20.78 ± 0.05/20.66 ± 0.07
HST	2005-01-10	19.31 ± 0.03/19.13 ± 0.03	19.80 ± 0.03/19.72 ± 0.03	20.77 ± 0.03/20.58 ± 0.03
BTA	2014-04-27	19.52 ± 0.10/19.49 ± 0.16	19.77 ± 0.05/19.66 ± 0.06	-/-
BTA	2015-01-18	-/19.41 ± 0.13	-/20.05 ± 0.07	-/20.77 ± 0.09
BTA	2017-03-31	-/20.42 ± 0.42	-/19.92 ± 0.10	-/20.51 ± 0.09
Zeiss1000	2017-12-13	20.19 ± 0.33/-	19.76 ± 0.08/-	-/-
Zeiss1000	2017-12-29	20.00 ± 0.24/20.39 ± 0.49	19.83 ± 0.08/19.72 ± 0.08	-/-
BTA	2018-02-19	20.31 ± 0.33/20.68 ± 0.4	20.01 ± 0.10/20.02 ± 0.11	-/-
BTA	2018-04-13	20.57 ± 0.36/21.01 ± 0.63	20.04 ± 0.08/19.99 ± 0.09	-/-
2.5-m,SAI MSU	2018-04-29	20.22 ± 0.12/20.31 ± 0.12	20.20 ± 0.05/20.21 ± 0.06	20.83 ± 0.11/20.71 ± 0.07

3.2 NGC4736_1



Спектры NGC 4736_1, полученные в 2015 г. (вверху), 2018 г. (в центре) и 2020 г. (внизу). Обозначены основные спектральные линии. Неотмеченные короткие и длинные галочки обозначают линии Fe II и [Fe II] соответственно.

3.2 NGC4736_1

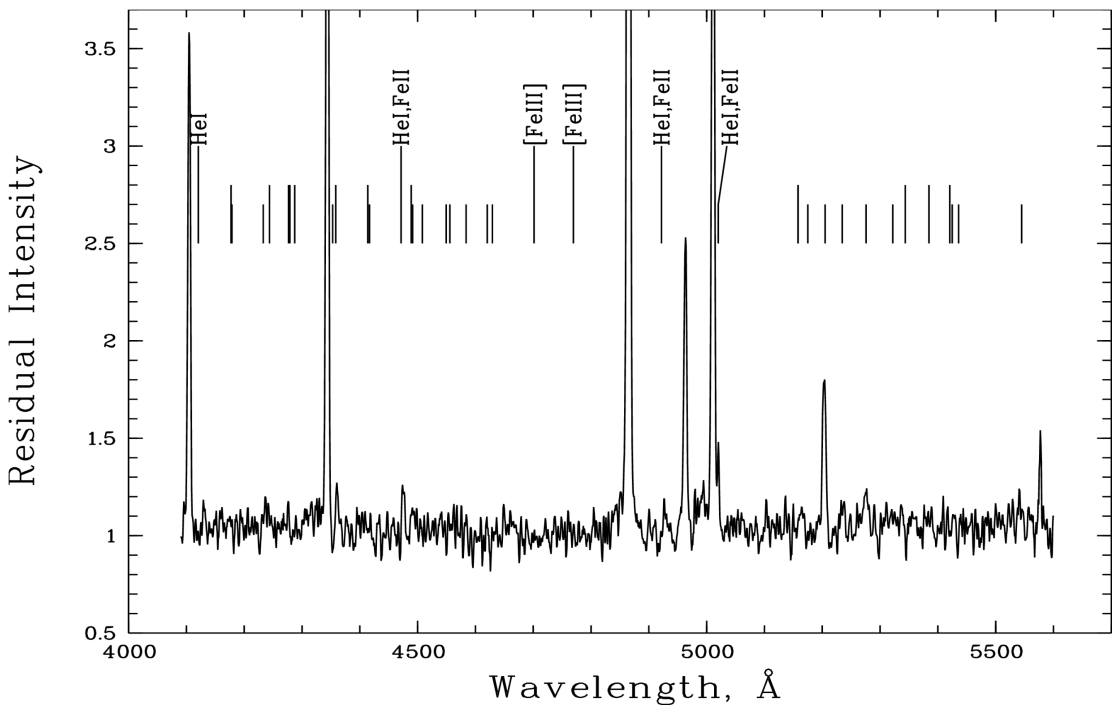
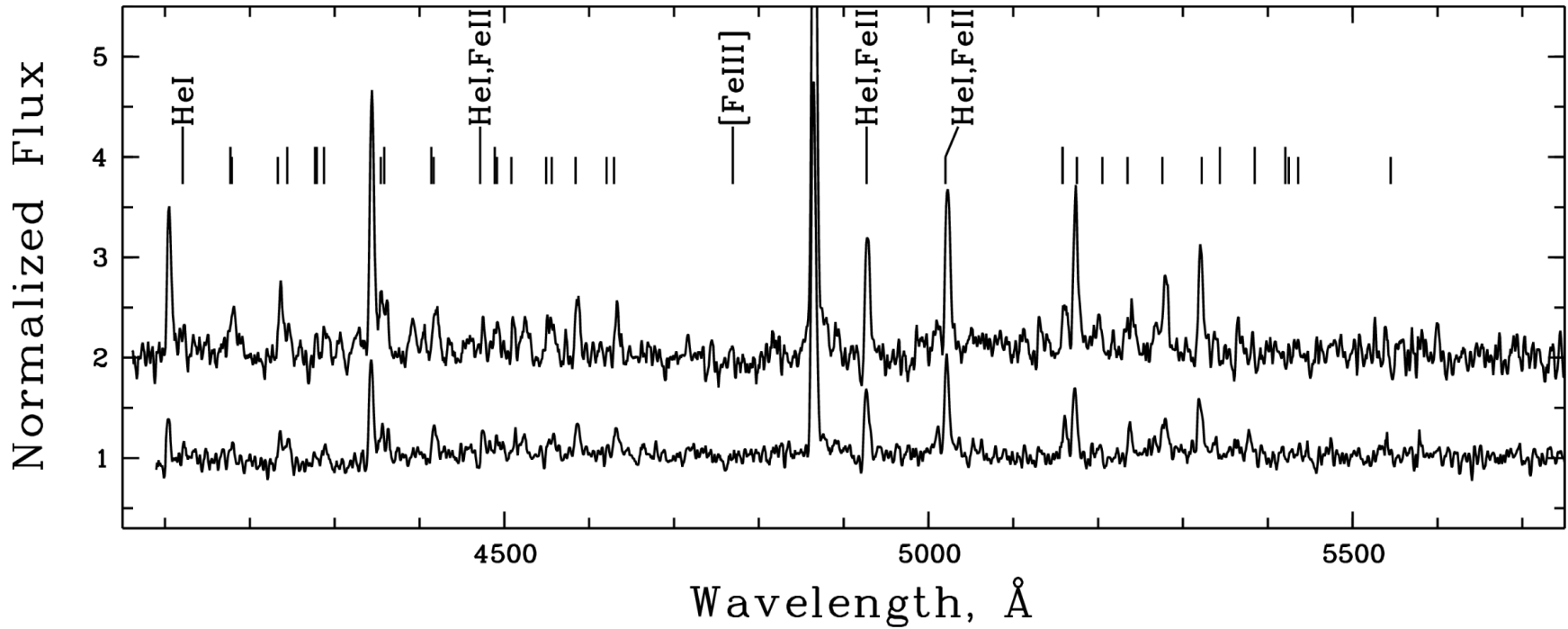


Слева: Кривая блеска объекта NGC 4736_1 в полосах В (кружки) и V (квадраты). Кривая блеска в фильтре В смещена вниз на 2 звёздных величины. Справа: Диаграммы «показатель цвета - звездная величина» в фильтре В для NGC4736_1 (вверху) и для V532 из галактики M33 (Sholukhova et al. 2011)

$$\Delta V = 1.18 \pm 0.12^m$$

$$\Delta B = 0.90 \pm 0.12^m$$

3.3 и 3.4 NGC4736_2, NGC4736_3



Вверху: Спектры NGC4736_2, полученные в 2015 г. (верхний), 2018 г. (нижний). Обозначены основные спектральные линии. Неотмеченные короткие и длинные галочки обозначают линии Fe II и [Fe II] соответственно.

Внизу: Спектр NGC 4736_3, полученный в 2017 году на телескопе БТА/SCORPIO.

Глава 3.

Оценки некоторых фундаментальных параметров исследуемых объектов. Звёздные величины, оценки температур и светимостей относятся к измерению 2005 года по архивным данным HST.

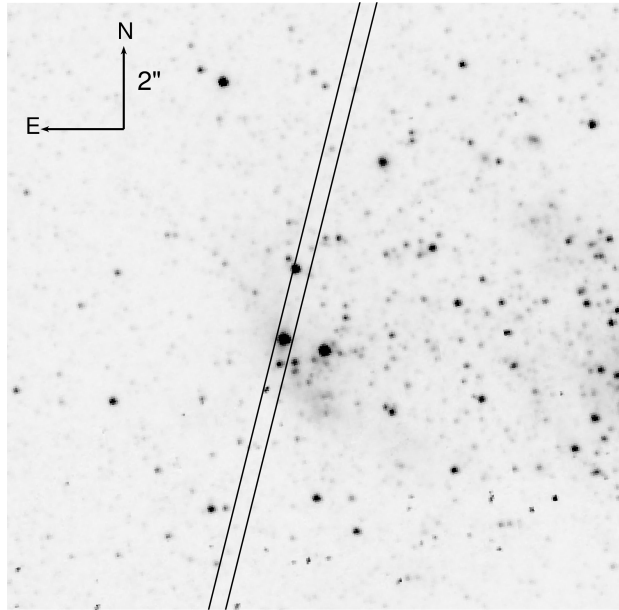
Объект	Видимая звёздная величина V, mag	Оценка A_V , mag	M_V , исправленная за поглощение	Оценка T, кК	$\log(L_{bol}/L_{sun})^*$
NGC4736_1	19.13±0.03	1.0 ± 0.1	-10.2+0.1	17±3	6.5±0.2
NGC4736_2	19.72±0.03	-	< -8.6	15±3	> 5.9
NGC4736_3	20.53±0.03	0.47±0.21	-8.2±0.2	9.3±1.0	5.3±0.2

Глава 4. Два новых LBV кандидата в галактике NGC 247

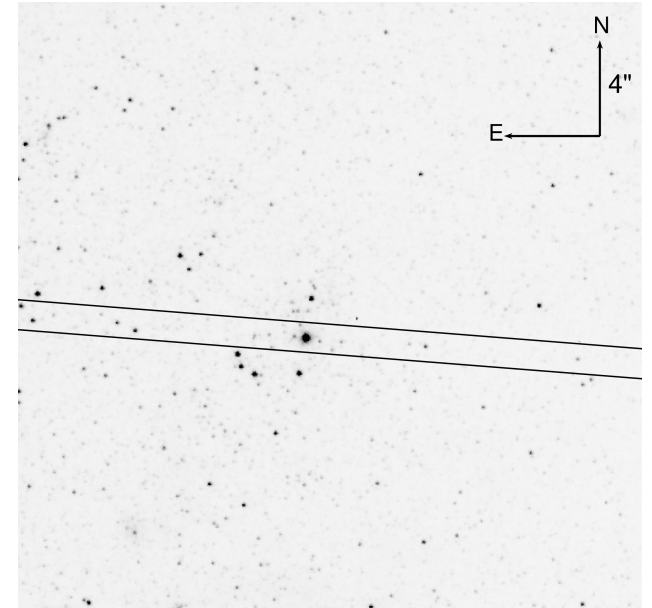
NGC247:
D = 3.52 Мпк

ACS/WFC/F606W

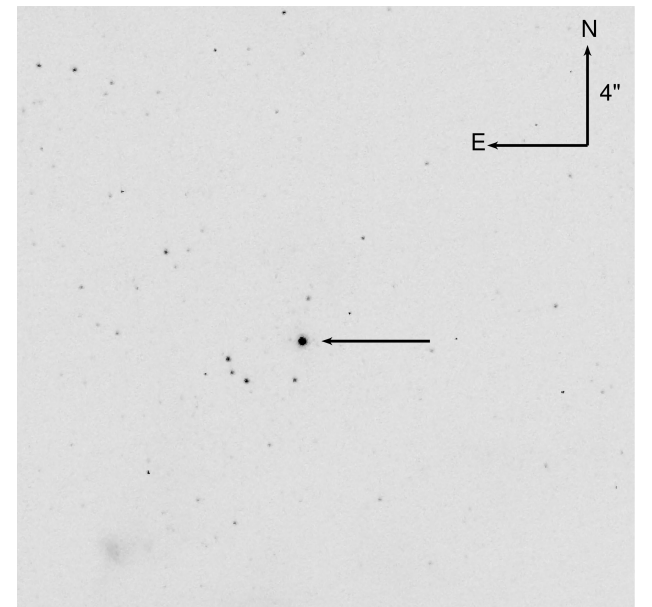
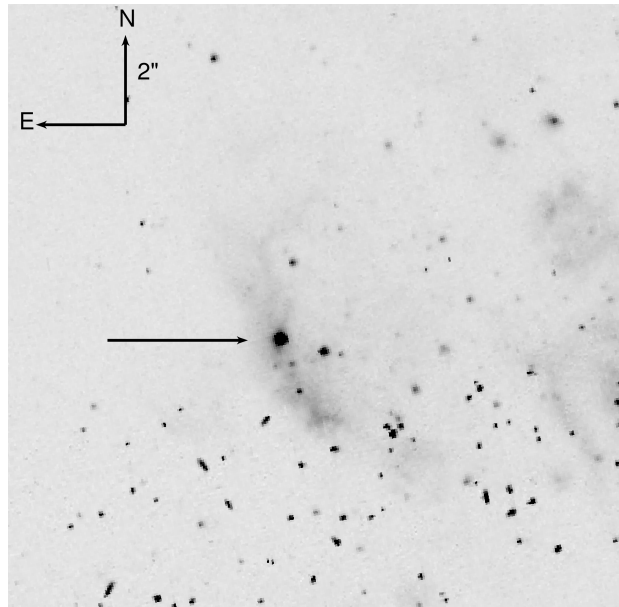
j004703.27-204708.4



j004702.18-204739.93



ACS/WFC/F658N



4.1 Наблюдения

Результаты фотометрии в оптическом диапазоне. В колонках перечислены инструменты, даты и видимые звёздные величины, не исправленные на межзвёздное поглощение

Telescope	Date	U, mag	B, mag	V, mag	R, mag	I, mag
j004703.27-204708.4						
2.2m ESO/MPG	2002/10/08	—	19.39 ± 0.08	19.27 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/06/24	—	19.29 ± 0.07	19.17 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/10/19	—	—	19.17 ± 0.07	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/10/22	—	19.30 ± 0.07	—	—	—
ESO/VLT/FORS2	2004/06/19	—	19.38 ± 0.05	19.22 ± 0.06	—	—
2.2m ESO/MPG	2004/10/17	—	19.28 ± 0.09	19.17 ± 0.07	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/01/06	—	—	19.10 ± 0.09	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/06/09	—	—	18.83 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/09/26	—	19.15 ± 0.08	19.01 ± 0.09	—	—
2.2m ESO/MPG	2006/09/25	—	19.30 ± 0.08	19.22 ± 0.10	—	—
HST/ACS/WFC	2011/10/11	—	19.89 ± 0.04	19.71 ± 0.04	—	—
Subaru	2016/10/09*	18.83 ± 0.10	19.54 ± 0.11	19.45 ± 0.09	19.13 ± 0.09	19.10 ± 0.09
2.5-m, SAI MSU	2018/09/20	—	—	19.37 ± 0.10	19.01 ± 0.10	—

4.1 Наблюдения

j004702.18-204739.93

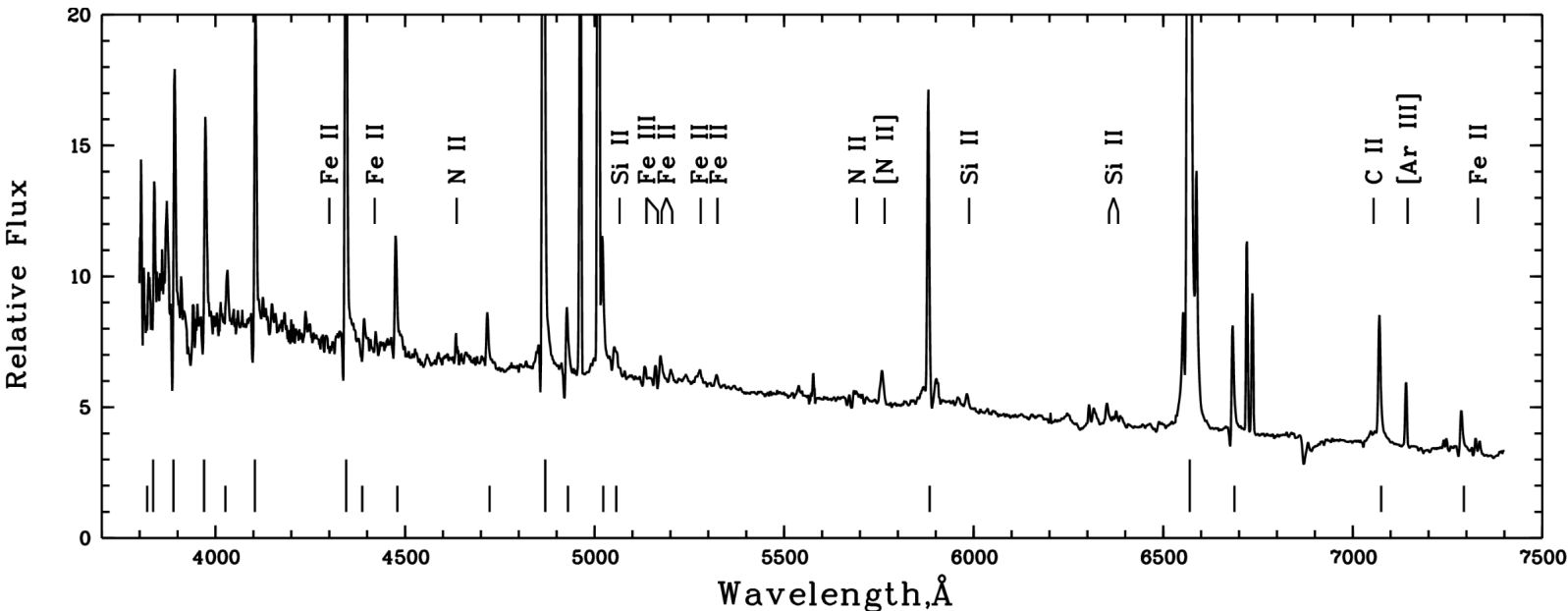
JKT	1994/08/16	—	18.94 ± 0.09	—	18.81 ± 0.10	—
Danish 1.54-m	1997/09/08	18.27 ± 0.12	18.82 ± 0.07	18.89 ± 0.07	18.90 ± 0.11	—
2.2m ESO/MPG	2002/10/08	—	19.08 ± 0.07	18.96 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/06/24	—	19.01 ± 0.06	18.94 ± 0.07	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/10/19	—	—	18.88 ± 0.07	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/10/22	—	18.96 ± 0.07	—	—	—
ESO/VLT/FORS2	2004/06/19	—	19.02 ± 0.05	18.96 ± 0.06	—	—
2.2m ESO/MPG	2004/10/17	—	19.09 ± 0.07	18.98 ± 0.06	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/06/09	—	—	18.94 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/09/26	—	18.95 ± 0.06	18.87 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2006/09/25	—	18.98 ± 0.07	—	—	—
CTIO 0.9m	2009/08/21	18.16 ± 0.13	18.82 ± 0.10	18.88 ± 0.11	18.87 ± 0.11	—
HST/ACS/WFC	2011/10/11	—	18.83 ± 0.03	18.71 ± 0.04	—	—
Subaru	2016/10/09	18.38 ± 0.10	18.97 ± 0.10	18.97 ± 0.09	18.78 ± 0.09	18.63 ± 0.09
2.5-m, SAI MSU	2018/09/20*	—	—	19.00 ± 0.08	18.88 ± 0.09	—
Zeiss-1000, SAO RAS	2019/11/15	—	19.03 ± 0.16	18.95 ± 0.10	18.87 ± 0.11	—

Заметки. * Эти фотометрические наблюдения проводились одновременно или квази-одновременно со спектроскопией.

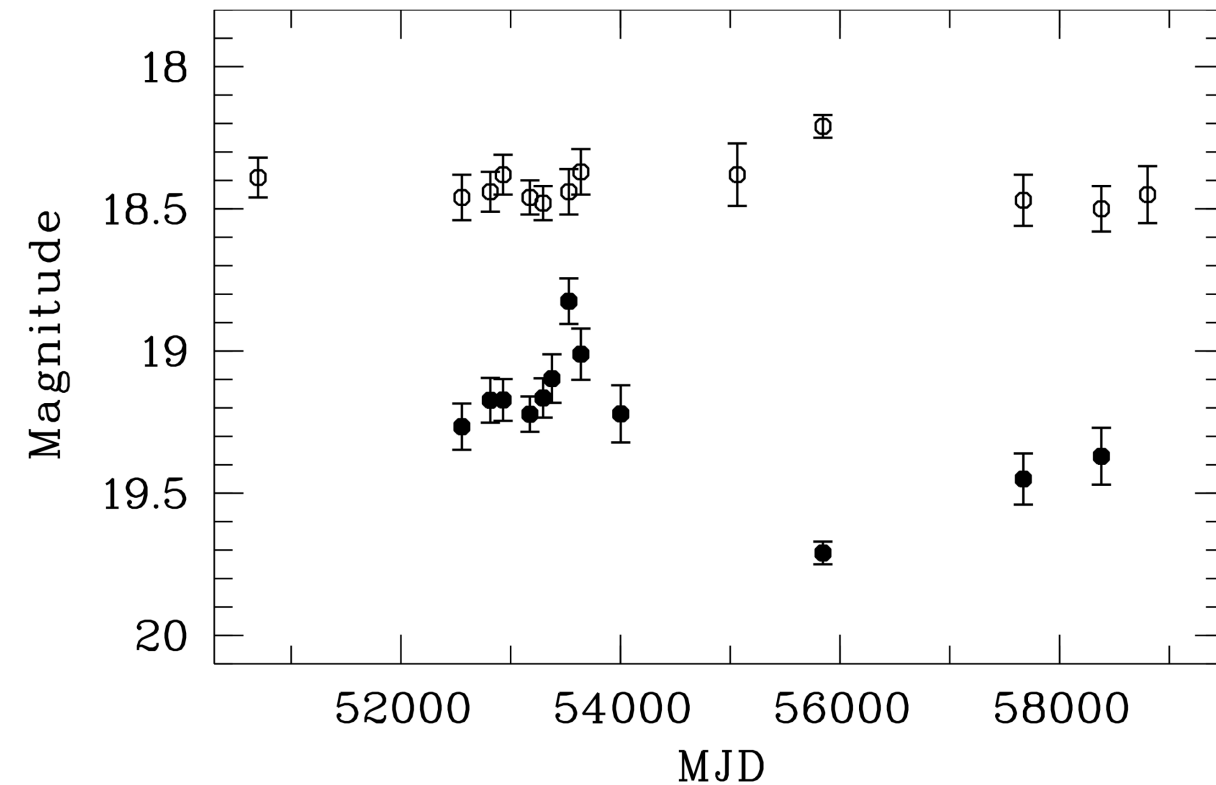
Результаты ИК-фотометрии.

Object	HST/WFC3/IR (2014/06/30)		Spitzer/IRAC (2012/10/17)	
	F105W, mag	F160W, mag	3.6 μ m, mag	4.5 μ m, mag
j004703.27-204708.4	19.17 ± 0.04	18.57 ± 0.04	16.20 ± 0.16	16.09 ± 0.14
j004702.18-204739.93	18.67 ± 0.04	18.13 ± 0.04	15.91 ± 0.13	15.25 ± 0.11

4.2 j004703.27-204708.4



Спектр j004703.27-204708.4, полученный на телескопе Subaru. Короткими и длинными штрихами обозначены линии гелия He I и линии водорода бальмеровской серии H соответственно.

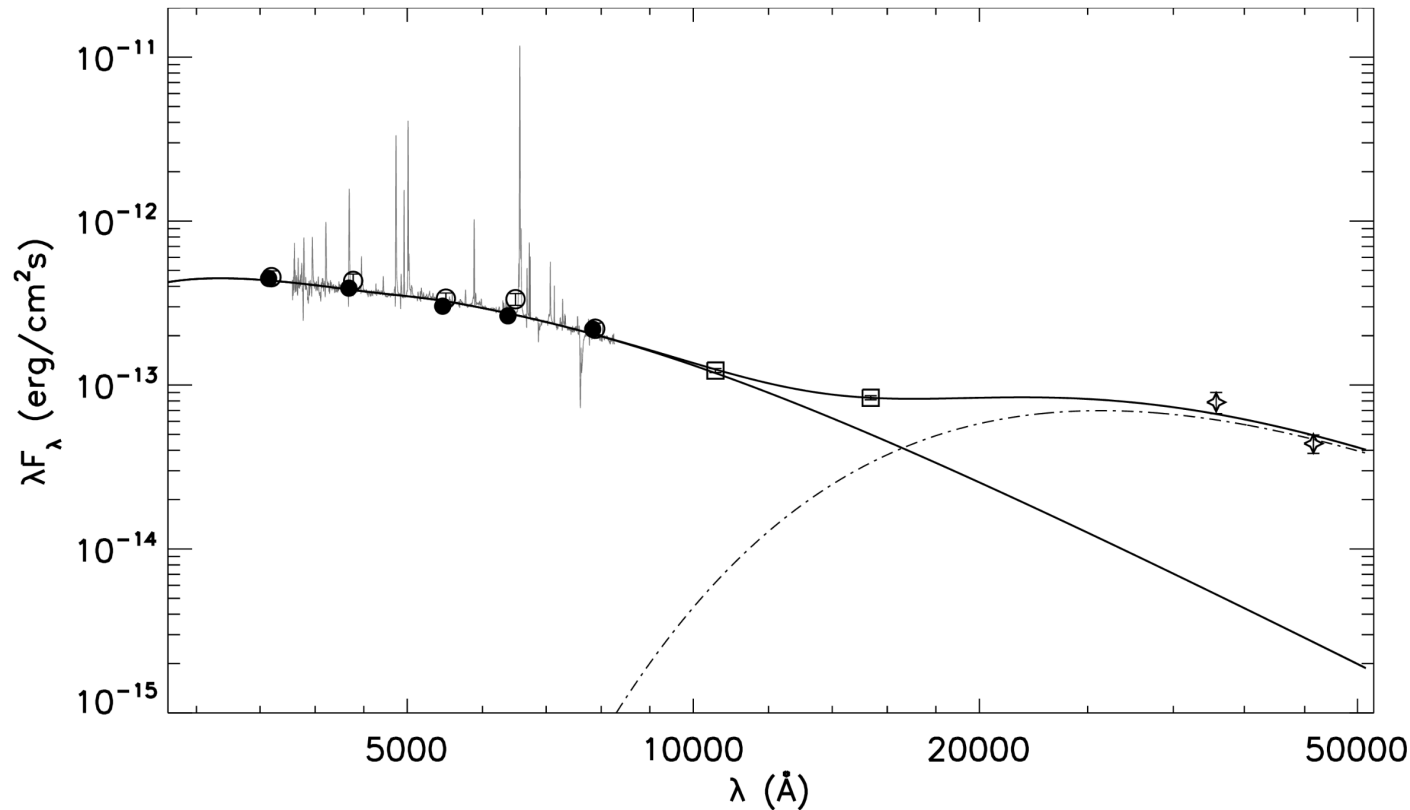


Кривые блеска j004702.18-204739.93 (незаполненные символы) и j004703.27-204708.4 (заполненные символы) в полосе V. Для лучшей визуализации кривая блеска j004702.18-204739.93 была смещена на -0.5 mag.

$$\Delta V = 0.88 \pm 0.09^m$$

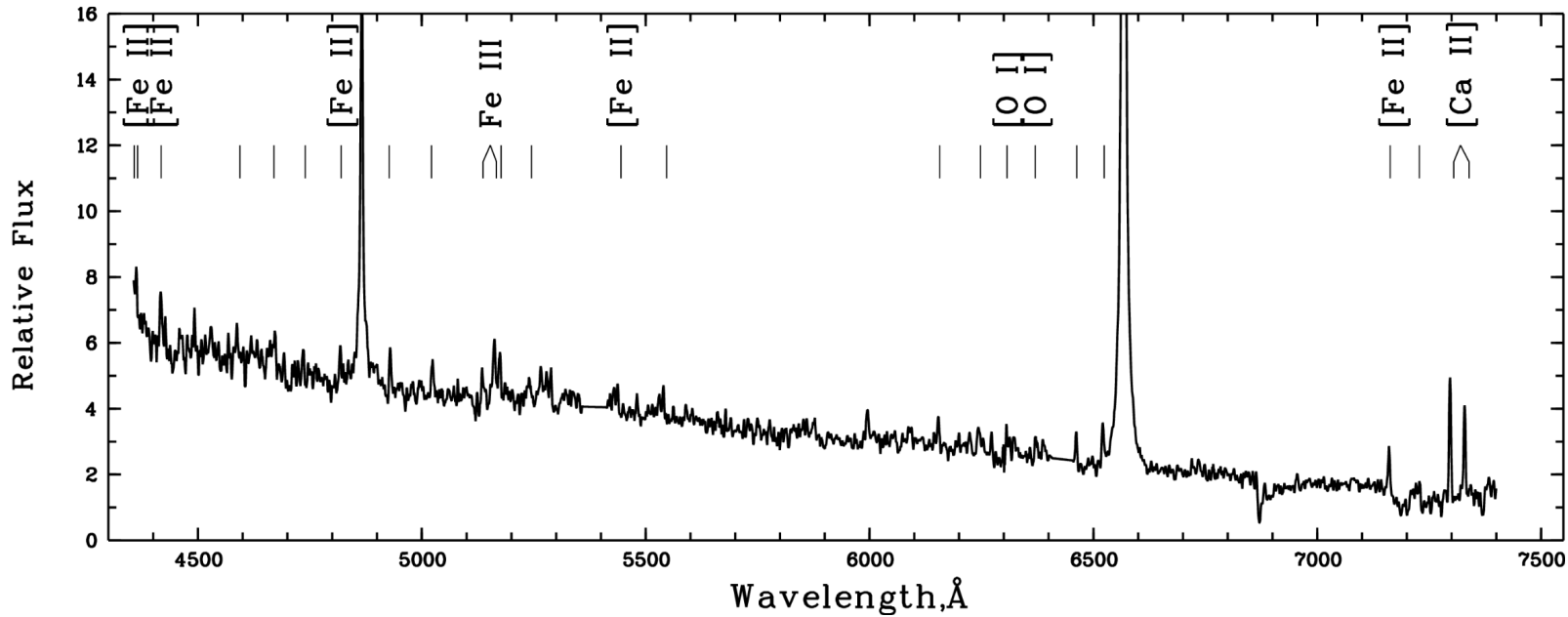
$$\Delta B = 0.74 \pm 0.09^m$$

4.2 j004703.27-204708.4

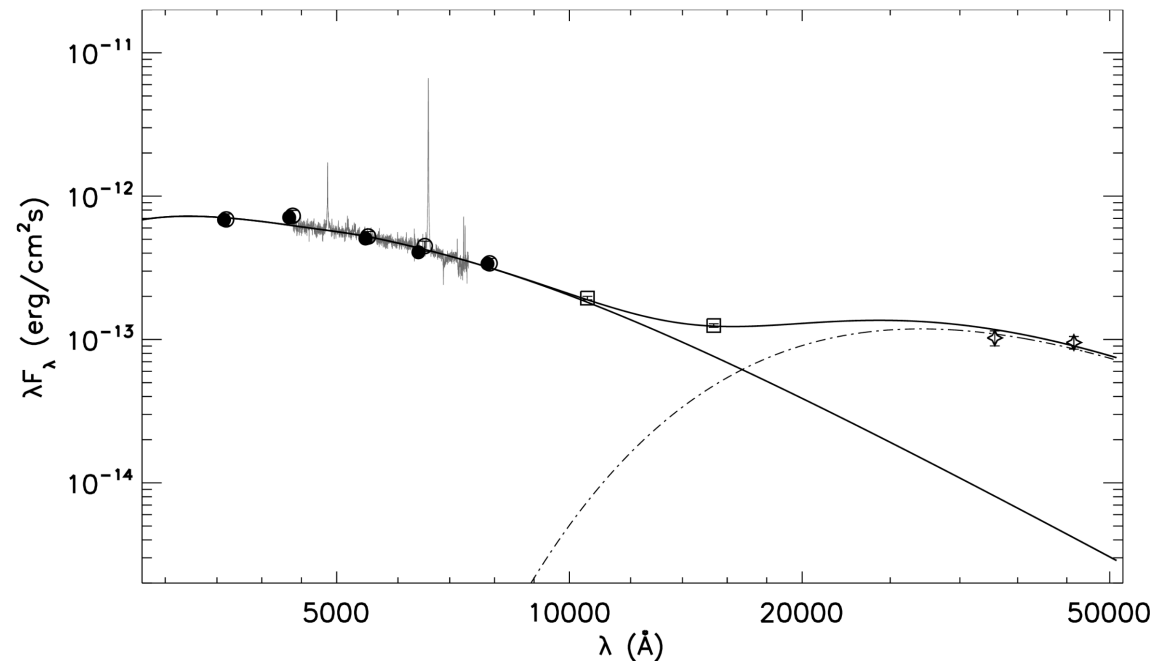


Спектральное распределение энергии j004703.27-204708.4. Кружками обозначена фотометрия $UBVR_cI_c$ Subaru (2016), заполненные кружки обозначают потоки, скорректированные за вклад ярких эмиссионных линий, незаполненные кружки - исходные потоки. Квадраты и крестики обозначают ИК-фотометрию по данным HST/WFC3/IR в полосах F105W и F160W (2014) и Spitzer/IRAC в полосах 3.6 мкм и 4.5 мкм (2012) соответственно. Наблюдаемые спектры показаны серым цветом. SED аппроксимирован двумя чернотельными функциями (сплошные линии), описывающими излучение фотосферы звезды (пунктирная линия) и ИК-избыток (штрихпунктирная линия), возникающий, вероятно, из пылевой оболочки вокруг звезды. Наиболее подходящими параметрами модели являются $T_{\text{SED}} = 18000 \pm 2000 \text{ K}$, $A_V \approx 0.9$, $T_{\text{dust}} \approx 1400 \text{ K}$.

4.3 j004702.18-204739.93

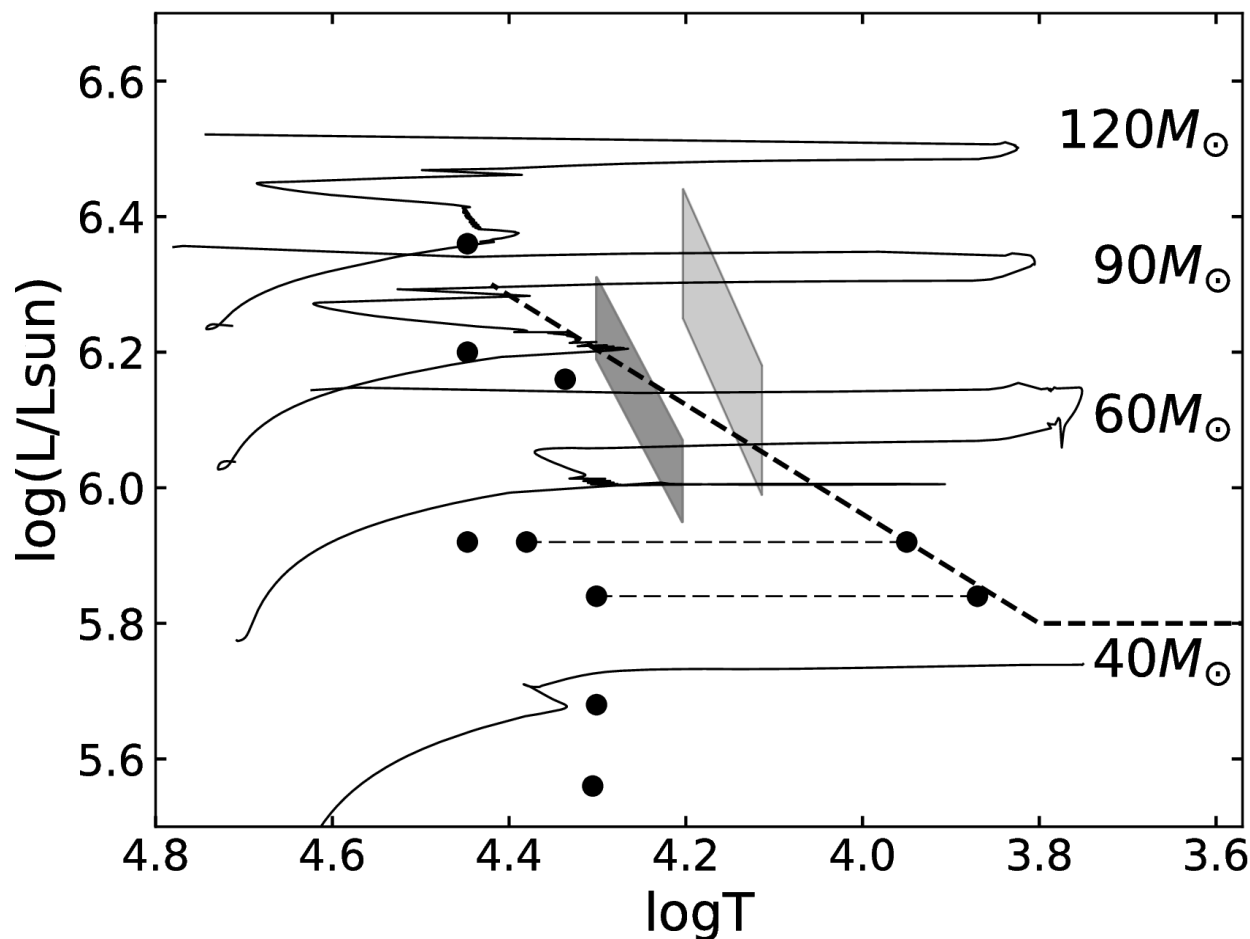


Спектр j004702.18-204739.93, полученный на телескопе SALT. Неотмеченные штрихи обозначают линии железа Fe II.



Спектральное распределение энергии j004702.18-204739.93. SED аппроксимирован двумя чернотельными функциями (сплошные линии), описывающими излучение фотосферы звезды (пунктирная линия) и ИК-избыток (штрихпунктирная линия), возникающий, вероятно, из пылевой оболочки вокруг звезды. Наиболее подходящими параметрами модели являются $T_{\text{SED}} = 15000 \pm 2000$ K, $A_V \approx 0.7$, $T_{\text{dust}} \approx 1300$ K.

4.4 Положение LBV-кандидатов из галактики NGC 247 на диаграмме Герцшпрунга-Рессела



j004703.27-204708.4

$A_V = 0.8 \pm 0.1 \text{ mag}$

$T_{\text{SED}} = 18000 \pm 2000 \text{ K}$

$T_{\text{dust}} \sim 1400 \text{ K}$

$M_{\text{BOL}} = -10.5^{+0.5}_{-0.4} \text{ mag}$

$\log(L_{\text{BOL}}/L_{\text{SUN}}) = 6.11^{+0.20}_{-0.16}$

j004702.18-204739.93

$A_V = 0.9 \pm 0.2 \text{ mag}$

$T_{\text{SED}} = 15000 \pm 2000 \text{ K}$

$T_{\text{dust}} \sim 1300 \text{ K}$

$M_{\text{BOL}} = -10.8^{+0.5}_{-0.6} \text{ mag}$

$\log(L_{\text{BOL}}/L_{\text{SUN}}) = 6.24^{+0.20}_{-0.25}$

Диаграмма температура-светимость с эволюционными треками массивных звезд для металличности $Z = 0.008$. Возможные положения j004703.27-204708.4 и j004702.18-204739.93 показаны темно-серой и светло-серой областями соответственно. Толстая штриховая линия обозначает предел Хамфрис-Дэвидсона. Для наглядности черными кружками показаны положения подтвержденных LBV звезд из галактик M31 и M33, а тонкие штриховые линии обозначают переходы между состояниями LBV-звезд Var B и Var C (взяты из [Humphreys R., et al. 2017])

Заключение

- Обнаружены 5 LBV-кандидатов в галактиках NGC 4736 и NGC 247. Анализ спектров этих кандидатов выявил характерные для подтверждённых LBV звезд спектральные особенности. Проведены фотометрические измерения всех 5 объектов по архивным данным наземных телескопов, космического телескопа им. Хаббла, а также новых данных, полученных на российских телескопах;
- Выявлена спектральная и фотометрическая переменность у звезды NGC 4736_1, на основании чего этот объект был классифицирован как LBV звезда;
- Выявлена значительная фотометрическая переменность кандидата j004703.27-204708.4, однако, спектральная переменность пока не наблюдалась, поэтому j004703.27-204708.4 сохраняет за собой статус LBV кандидата;
- Оценены некоторые фундаментальные параметры всех 5 кандидатов;
- Построены спектральные распределения энергии кандидатов j004703.27-204708.4 и j004702.18-204739.93, которые выявили наличие газопылевых оболочек, температура которых также была оценена;

Список публикаций

- Y.N. Solovyeva, S.N. Fabrika, A.S. Vinokurov, O.N. Sholukhova, A.F. Valeev. Emission objects in young stellar clusters. ASPCS, Vol.510,p. 58, 2017;
- Y. Solovyeva, A. Vinokurov, S. Fabrika, A. Kostenkov, O. Sholukhova, A. Sarkisyan, A. Valeev, K. Atapin, O. Spiridonova, A. Moskvitin, E. Nikolaeva. «New luminous blue variable candidates in NGC 4736» . Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 484, Issue 1, 21 March 2019, Pages L24–L28;
- Y. N. Solovyeva, A. S. Vinokurov, S. N. Fabrika, A. N. Sarkisyan, O. N., Sholukhova, E. A. Nikolaeva. «NEW LBV CANDIDATES IN NGC 247 GALAXY», Astronomical Journal of Azerbaijan, 2019, accepted;
- Y. Solovyeva, A. Vinokurov, A. Kostenkov, A. Sarkisyan, K. Atapin, A. Valeev. «New data for the LBV in NGC 4736», Astronomical and Astrophysical Transactions, 2020, submitted;
- Y.Solovyeva, A. Vinokurov, A. Sarkisyan, K. Atapin, S. Fabrika, A. Kniazev, O. Sholukhova, O. Maslennikova. «New luminous blue variables candidates in the NGC 247 galaxy», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted;

Личный вклад автора

- Участие автора в подготовке программ наблюдений (БТА, Цейсс-1000 САО РАН, SALT) и наблюдениях на телескопах САО РАН;
- Первичная обработка спектроскопических и фотометрических наблюдательных данных, проведение фотометрических измерений;
- Определение фундаментальных параметров исследуемых звёзд, участие в обсуждении и интерпретации результатов наравне с соавторами;
- Определяющий вклад автора в подготовке статей.

Апробация работы

- INTERNATIONAL ASTRONOMY CONFERENCE “ Stars:from collapse to collapse, САО РАН,п. Нижний Архыз, 3-7.10.2016;
- Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”, ИКИ РАН, г. Москва, 18-21.12.2017;
- Международная конференция «Звёзды, планеты и их магнитные поля», СПбГУ, г. Санкт-Петербург, 17-21.09.2018;
- Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”, ИКИ РАН, г. Москва, 18-21.12.2018;
- Международная конференция «Physics of Stars and Planets: Atmospheres, Activity, Magnetic fields», Азербайджан, г. Шемаха, 16-20.09.2019;
- Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия – 2019», Нижний Архыз, САО РАН, 7-11.10.2019;

Спасибо за внимание