

УДК 524.72-54:520.82

## МОНИТОРИНГ ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В «СЕВЕРНОМ КОЛЬЦЕ» ГАЛАКТИКИ DDO 68 В 2016–2023 ГГ.

© 2024 С. А. Пустильник<sup>1\*</sup>, Ю. А. Перепелицына<sup>1</sup>, А. С. Винокуров<sup>1</sup>,  
Е. С. Егорова<sup>2,3</sup>, А. С. Москвитин<sup>1</sup>, В. П. Горанский<sup>2</sup>,  
А. Н. Буренков<sup>1</sup>, О. А. Масленникова<sup>1</sup>, О. И. Спиридонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

<sup>3</sup>Институт астрономических вычислений, Центр астрономии Гейдельбергского университета, 69120 Германия

Поступила в редакцию 2 июня 2024; после доработки 13 сентября 2024; принята к публикации 17 сентября 2024

Карликовая галактика DDO 68 расположена в одной из близких пустот и характеризуется активным звездообразованием (ЗО) и одной из самых низких металличностей газа в местной Вселенной:  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 6.96 - 7.3$  dex. Шесть областей ЗО DDO 68 локализованы в так называемом «Северном кольце» или вблизи него. На снимках космического телескопа им. Хаббла (HST) в этих областях найдено множество ярких молодых звезд. Мы приводим результаты оптического мониторинга для этих шести областей ЗО за 35 эпох в течение 2016–2023 гг. Данные были получены с помощью 6-м (БТА) и 1-м телескопов Специальной астрофизической обсерватории РАН и 2.5-м телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Мы дополняем эти результаты архивными данными с десяти других телескопов, полученными для 11 эпох в период 1988–2013 гг., а также результатами трех наблюдений на БТА САО РАН в период с 2005 по 2015 г. Целью этой работы был поиск переменности блеска этих областей ЗО, с тем чтобы связать ее с вероятными вариациями светимости самых ярких звезд в них. Одна из таких звезд, DDO 68-V1 (в области 3), в 2008 г. была классифицирована как яркая голубая переменная звезда (LBV), образовавшаяся из газа с самой низкой металличностью. В предыдущие эпохи переменность интегрального блеска области 3 достигала примерно  $0^{\text{m}}8$ . Начиная с 2016 г. амплитуда вариаций блеска области 3 достигала  $0^{\text{m}}3$ . Для остальных областей ЗО, из-за меньших амплитуд, проявление переменности менее выражено. Наличие вариаций блеска мы проверяем с использованием критерия  $\chi^2$  и так называемой робастной медианной статистики. Также мы обсуждаем вопрос устойчивости вывода об обнаружении переменности. Для всех областей ЗО переменность их кривых блеска выявляется согласно обоим критериям. При этом по критерию  $\chi^2$  уровень значимости  $\alpha = 0.0005$ . Амплитуды переменности составляют  $0^{\text{m}}09$ ,  $0^{\text{m}}13$ ,  $0^{\text{m}}11$ ,  $0^{\text{m}}08$  и  $0^{\text{m}}16$  для областей 1, 2, 4, 5 и 6 соответственно. Амплитуды соответствующих вариаций блеска ярчайших сверхгигантов в этих областях могут достигать  $3^{\text{m}}0$ .

Ключевые слова: звезды: массивные — звезды: переменные: общее — звезды: индивидуальное (DDO 68-V1) — звезды: металличность — галактики: индивидуальное: DDO 68 (UGC 5340, VV 542)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Массивные звезды (условно  $8-100 M_{\odot}$  и более) являются очень важным элементом нескольких взаимосвязанных направлений в астрофизике, от звездообразования и его обратного влияния на межзвездный газ, образования и эволюции галактик до космологических проблем, связанных с реионизацией межгалактической среды. Из-за

короткого времени жизни массивные звезды в Галактике имеют металличность, близкую к текущей металличности газа, то есть  $Z \sim Z_{\odot}$ .

Существует несколько задач, связанных с изучением массивных звезд в контексте различия их металличности. В частности, понимание свойств массивных звезд с очень низким  $Z \lesssim Z_{\odot}/30$  имеет решающее значение для изучения и моделирования формирования и эволюции галактик в ранней Вселенной. Проверка современных моделей массивных звезд с очень низким содержанием металлов на

\*E-mail: sap@sao.ru

реальных объектах предполагает поиск и изучение таких объектов во внешних галактиках.

Металличность газа в ближней Вселенной варьируются в диапазоне  $(0.02-3) Z_{\odot}$ . В силу известной связи между массой (или светимостью) и металличностью газа в галактиках поздних типов, ожидается, что массивные звезды с самыми низкими металличностями формируются в настоящее время в карликовых галактиках. Согласно статистической связи между металличностью газа и светимостью галактик поздних типов в Местном объеме (МО) (Berg et al., 2012), карликовые галактики с металличностью газа (а значит, и молодых массивных звезд)  $Z \lesssim Z_{\odot}/30$  (экстремально низкометаллические, далее ХМР) должны быть весьма слабыми, с  $M_B \gtrsim -9^m$ . Такие слабые карлики и их массивные звезды доступны для изучения только в пределах МО и его окрестностей. Ближайший карлик с такой низкой металличностью, Leo P (Skillman et al., 2013), содержит единственную H II область, возбуждаемую одной звездой класса O7–8 V. Недавно она была изучена в работе Telford et al. (2023). Чтобы существенно продвинуться в изучении массивных звезд с такими экстремально низкими  $Z$  (включая массивные звезды на продвинутых стадиях эволюции), нужны ХМР-галактики со многими массивными звездами, расположенные в пределах МО (García et al., 2021).

Согласно результатам наших спектральных исследований галактик войдов (Pustilnik et al., 2021; 2020; 2024; 2016), ХМР-карлики находятся преимущественно в войдах. Более того, при данной светимости они демонстрируют существенно пониженную металличность газа. И наоборот, при их очень низкой металличности они являются существенно более яркими по сравнению с галактиками реперной выборки из работы Berg et al. (2012), которые находятся в более плотном окружении. Поэтому вероятность найти много массивных звезд в ХМР-карликах войдов выше, чем у аналогичных карликов вне войдов.

Голубые переменные высокой светимости (LBV, Luminous Blue Variable) представляют собой относительно короткую, переходную и довольно нестабильную стадию эволюции массивных звезд от O-звезд главной последовательности, поддерживаемых горением водорода, до звезд Вольфа–Райе (WR) с горением гелия в ядре (Humphreys and Davidson, 1994). На этой стадии эволюции массивные звезды теряют значительную массу за счет мощного ветра и путем «нормальных» выбросов с типичным временным масштабом от года до нескольких лет на одно событие. К тому же, появились некоторые свидетельства того, что LBV также могут быть прямыми предшественниками взрывов сверхновых типа II (см., например, Petrov et al., 2016, и ссылки в этой статье).

Природа переменных ветров в массивных звездах лучше изучена для звезд с солнечной и субсолнечной металличностями, для которых мощность ветра падает с уменьшением металличности  $Z$ , что указывает на доминирующую роль радиационного давления на ионы металлов (см., например, Vink, 2022). Экстраполяция такого механизма формирования ветра на диапазон очень низких металличностей предполагает отсутствие звезд WR в наиболее обедненных металлами вспышках звездообразования. Однако популяция WR-звезд обнаружены в наиболее бедных металлами голубых компактных галактиках (BCGs) (например, Guseva et al., 2000). Данный факт свидетельствует о том, что для формирования ветров массивных звезд при очень низкой металличности могут работать другие механизмы. Более того, для наиболее выдающихся событий, известных как «гигантские извержения» в LBV (giant eruptions), механизм радиационного давления может оказаться непригодным (например, Smith and Owocki, 2006).

Поэтому изучение отдельных массивных звезд с очень низким  $Z$  может быть критически важным при выборе наиболее надежных моделей. В этом контексте понимание процессов в LBV с очень низким содержанием металлов особенно важно, поскольку из-за присущего им очень нестационарного процесса потери массы их ожидаемые свойства должны быть более чувствительны к предположениям модели.

Недавние исследования массивных звезд с достаточно низкими металличностями, на уровне  $Z = Z_{\odot}/10$  в Sextans A (Lorenzo et al., 2022; Schootemeijer et al., 2022) и  $Z = Z_{\odot}/20$  в Leo A (Gull et al., 2022), являются важным шагом в понимании свойств массивных звезд с низкой металличностью. Однако поиск возможностей изучения массивных звезд при еще более низких  $Z$ , например в диапазоне  $Z_{\odot}/50-Z_{\odot}/40$ , по-прежнему остается весьма сложной задачей.

Число отдельных очень массивных звезд в галактиках с крайне низкой металличностью ( $Z \lesssim Z_{\odot}/30$ , что соответствует содержанию кислорода в газе родительской области 3O на уровне  $12 + \log(O/H) \lesssim 7.2$  dex) весьма ограничено в местной Вселенной. Тем более это относится к массивным звездам с экстремально низким  $Z$ , находящимся на продвинутых стадиях эволюции. Прежде всего это ряд звезд WR и красных сверхгигантов (RSG) в прототипной карликовой ХМР-галактике I Zw 18 (например, Izotov et al., 1997; LeGrand et al., 1997; Hirschauer et al., 2024), находящейся на расстоянии  $D \sim 16$  Мпк.

Другим важным объектом является карликовая ХМР-галактика DDO 68 на расстоянии  $D = 12.75$  Мпк ( $\mu = 30^m 53$ ), полученном TRGB-методом (Cannon et al., 2014; Makarov et al., 2017).

В этой галактике была открыта звезда LBV с самой низкой металличностью (также известная как DDO 68-V1) (Pustilnik et al., 2008; Izotov and Thuan, 2009). Кроме того, в работе Pustilnik et al. (2017) в ней отождествлено множество звезд сверхгигантов.

Галактика DDO 68 (UGC 5340, VV 542) находится в войде Lynx–Cancer. Эта карликовая иррегулярная галактика (dIrr) с необычной морфологией имеет несколько заметных молодых областей ЗО с почти рекордно низкой металличностью (со средней величиной  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 7.14$ ). Большинство из них расположены на периферии, главным образом в «Северном кольце» и «Южном хвосте» (Pustilnik et al., 2005; Izotov and Thuan, 2007). Эти области ЗО выглядят как молодые ОБ-ассоциации, содержащие десятки массивных звезд. Их типичные линейные размеры составляют несколько десятков парсек. Единственным исключением является компактная область 5, проявляющая свойства молодого шарового скопления с возрастом около 20 млн лет. Изображение областей 1–6 на снимке космического телескопа HST показано на рис. 1.

В работе Annibali et al. (2019) было найдено, что металличность в галактике DDO 68 меняется от  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \sim 7.3$  dex вблизи центра основного тела примерно до 7.0 dex в самой южной области ЗО. Впервые важность DDO 68 в контексте изучения массивных звезд с наименьшими металличностями была отмечена в работе Kniazev and Pustilnik (2006). И действительно, благодаря удаче, в ходе повторных спектральных наблюдений DDO 68 в 2008 г. в ней была открыта уникальная LBV, находящаяся в одной из наиболее обедненных металлами областей ЗО в местной Вселенной (Pustilnik et al., 2008; Izotov and Thuan, 2009).

Вопрос об эволюции и смерти экстремально бедных металлами массивных звезд остается одним из ключевых для понимания формирования и эволюции галактик на временах  $t \lesssim 1$  млрд лет после Большого взрыва (например, Barkana and Loeb, 2001; Eldridge and Stanway, 2022). Это особенно актуально в период активного наблюдательного исследования галактик с помощью космического телескопа Джеймса Уэбба (JWST) в эпоху около 0.5–1 млрд лет со времени Большого взрыва. Подавляющее большинство этих удаленных объектов представляют собой галактики с активным ЗО. Они демонстрируют широкий диапазон металличности, включая самые низкие значения, обнаруженные в местной Вселенной (см., например, Maseda et al., 2023).

Хотя современные модели эволюции звезд, в том числе с быстрым вращением, существенно продвинулись за последнее десятилетие (см., например, Chen et al., 2015; Szécsi et al., 2015, Sanyal

et al., 2017; Martins and Palacios, 2021 и ссылки в них), прямого сравнения предсказаний модели со свойствами реальных очень бедных металлами массивных звезд пока не имеется. Основная причина — отсутствие в местной Вселенной таких звезд, которые были бы доступны для достаточно детального изучения. Нас ожидает в ближайшем будущем качественный прогресс в наблюдательных возможностях, который будет достигнут с помощью строящихся гигантских оптических телескопов следующего поколения. Полезными предварительными шагами для будущих исследований с гигантскими телескопами являются поиск подобного типа редких массивных звезд и изучение их доступных свойств, таких как переменность.

Как сказано выше, основной целью мониторинга области «Северное кольцо» в DDO 68 является попытка изучить возможные особенности кривой блеска экстремально бедной металлами LBV-звезды DDO 68-V1. Однако изображения, использованные для этой задачи, охватывают пять других областей, в которых благодаря данным HST мы выделили множество других массивных звезд. В частности, список 50 ярчайших звезд (сверхгигантов с  $M_V \leq -6^m$ ) в этих областях приводится в работе Pustilnik et al. (2017). Их достаточно большую по амплитуде переменность можно обнаружить по изменению интегрального блеска областей, в которых они находятся.

Упомянутые выше области ЗО, за исключением области 5, являются достаточно молодыми, о чем свидетельствуют большие значения эквивалентных ширин эмиссионной линии H $\beta$  (Pustilnik et al., 2005). Для значений  $EW(\text{H}\beta) = 47\text{--}250 \text{ \AA}$  возраст одномоментных вспышек ЗО лежит в интервале 3–7 млн лет (Leitherer et al., 1999). Поэтому можно ожидать, что массивные ОБ-звезды на различных стадиях эволюции все еще видны. Активность их нестационарного звездного ветра может проявляться в виде значительной переменности блеска.

В нашей статье мы представляем обновленную кривую блеска области 3, содержащую наиболее обедненную металлами LBV-звезду DDO 68-V1. Эти данные будут использованы в следующей работе, посвященной изучению изменений блеска LBV после ее так называемого гигантского извержения в 2010–2013 гг. В данной публикации упор делается на «побочный продукт» — исследование переменности блеска в других областях ЗО. Мы впервые представляем звездные величины и кривые блеска областей 1, 2, 4, 5 и 6 и исследуем их на предмет возможной переменности с помощью известного критерия  $\chi^2$  и так называемой робастной медианной статистики (RoMS, Rose and Hintz, 2007; Burdanov et al., 2014).

Статья оформлена следующим образом. В разделе 2 мы приводим все использованные данные

наблюдений и кратко описываем их обработку. В разделе 3 представлены основные результаты обработки и анализа данных. В разделе 4 описаны массивы фотометрических данных для всех областей ЗО и их проверка на возможную переменность. Раздел 5 посвящен обсуждению новых результатов и сравнению с предыдущими, а также осмыслению их в более широком контексте. В разделе 6 мы подводим итоги и формулируем основные выводы.

Принятый линейный масштаб для DDO 68 составляет 62 пк в 1".

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

### 2.1. Данные телескопа БТА

Наблюдения упомянутых выше областей 1–6 проводились с помощью многорежимного прибора SCORPIO-1 (Afanasyev and Moiseev, 2005) в главном фокусе 6-м телескопа САО (БТА). Параметры наблюдений приведены в таблице 1. Подробности наблюдений представлены в наших статьях: Pustilnik et al. (2005), Pustilnik et al. (2008) и Pustilnik et al. (2017). SCORPIO-1 с ПЗС-приемником 2К × 2К EEV 42-40 использовался в режиме получения изображений с полем зрения 6', биннингом 2 × 2 и масштабом 0".356 пиксель<sup>-1</sup>.

### 2.2. Данные 1-м телескопа САО

В период 2016–2023 гг. мы проводили наблюдения на 1-м телескопе САО РАН в фильтрах *B*, *V* и *R* с помощью ПЗС-фотометра. Использовался детектор CCD-EEV 42-40 форматом 2048 × 2048 с размером поля 7.3 и масштабом (при биннинге 2 × 2) 0".432 пиксель<sup>-1</sup>.

Наблюдения проводились в мультипрограммные ночи с ограниченным временем на каждую из программ. Поэтому изображения DDO 68 были получены преимущественно в *V*-полосе. Когда обстоятельства позволяли, мы также делали снимки в *B*- и/или *R*-полосах. Параметры наблюдений представлены в таблице 1 и отмечены в столбце (4) как «1-м».

### 2.3. Данные 2.5-м телескопа КГО

Мы проводили наблюдения в полосах *V* и *R* на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ в 2017–2019 гг. Использовалась камера NBI 4296 × 4102 (сделанная в Институте Нильса Бора, Копенгаген) (Shatsky et al., 2020), установленная в фокусе Кассегрена

телескопа. Камера имеет поле зрения 10' × 10' и масштаб 0".16 пиксель<sup>-1</sup>.

За указанный период было проведено три наблюдения DDO 68. Два изображения были получены в полосе *V*. Первое — в апреле 2017 г. при полной экспозиции 25 минут, второе — в феврале 2018 г. при полной экспозиции 30 минут. Третье изображение мы получили в полосе *R* в январе 2019 г. в лунное время с полной экспозицией 30 минут. Детали см. в таблице 1.

### 2.4. Архивные данные из литературы

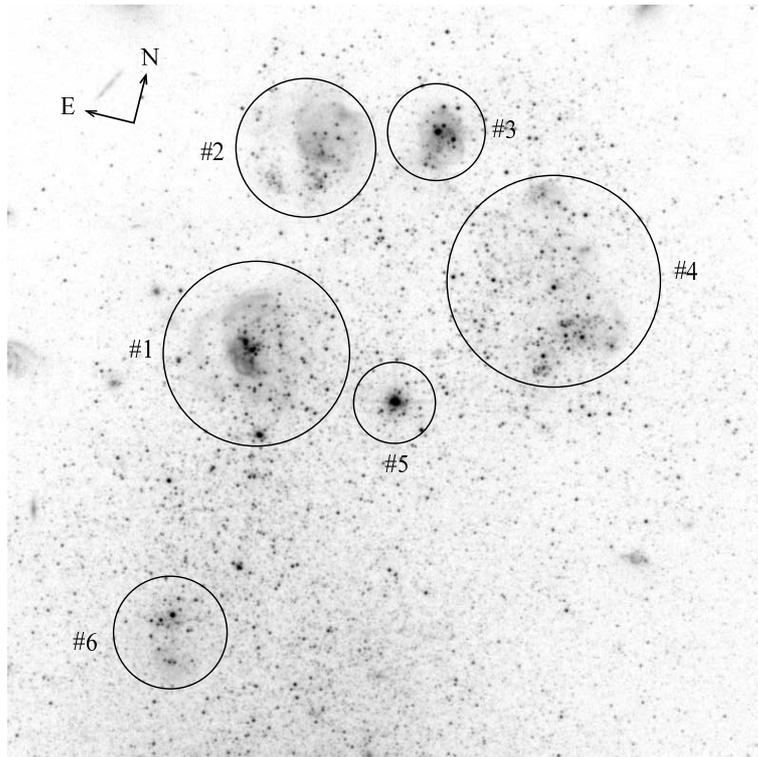
В дополнение к нашей новой фотометрии, полученной на 6-м и 1-м телескопах САО и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, представленных в таблице 1, были использованы также имеющиеся архивные ПЗС-изображения, которые мы проанализировали аналогичным образом. В таблице 2 представлена сводка наблюдений DDO 68 на основе архивов девяти наземных телескопов по всему миру и данных HST. Ниже мы даем краткие комментарии о происхождении этих данных и ссылки на статьи, в которых более подробно описаны программы наблюдений, связанные с этими архивными данными.

#### 2.4.1. Данные 3.5-м телескопа Калар-Альто

Наблюдения галактики DDO 68 проводились с ПЗС-камерой прямого фокуса 3.5-м телескопа обсерватории Калар-Альто в темное время при фотометрических условиях в ночь 14 февраля 1988 г. для программы из работы Norr and Schulte-Ladbeck (1995). Использовался чип высокого разрешения RCS с полем зрения 256" на 160" и разрешением 0".5 пиксель<sup>-1</sup>. Для DDO 68 изображения были получены в полосах *B* и *R*, с временами экспозиции 900 и 600 с соответственно. Кружок рассеяния составлял 1".1. Наблюдения галактик сопровождалась необходимыми калибровочными кадрами приемника (электронный ноль, темновые кадры и плоское поле). После вычитания кадра с электронным нолем устранялся темновой ток, удалялись плохие столбцы и проводилось исправление кадров за плоское поле.

#### 2.4.2. Данные 2.54-м телескопа им. Исаака Ньютона

Изображение DDO 68 было получено 5 февраля 1994 г. в работе Swaters and Balcells (2002) в полосе *R* Джонсона–Казинса при кружке рассеяния 1".86, с временем экспозиции 1200 с. Для наблюдения был использован детектор CCD-EEV 4К × 2К (EEV XHIP) с масштабом 0".549 пиксель<sup>-1</sup>.



**Рис. 1.** Часть HST-изображения DDO 68 в фильтре  $F606W$ , центрированная на «Северное кольцо» (области 1–5), включающая область 6 на юго-востоке, с наложением используемых для фотометрии апертур. Изображение было получено 1 мая 2010 г. по программе HST ID 11578 (PI Aloisi). Диаметры апертур (в угловых секундах) следующие: область 1 (10.0), область 2 (8.0), область 3 с DDO 68-V1 в центре (5.0), область 4 (11.0), область 5 (4.4), область 6 (6.0).

#### 2.4.3. Данные 2.56-м NOT

Наблюдения DDO 68 на 2.56-м Nordic Optical Telescope (NOT, остров Ла Пальма) проводились 7 февраля 1995 г. по программе из работы Makarova and Karachentsev (1998). Изображения в полосах  $B$  и  $V$  были получены с экспозициями 300 с, при кружке рассеяния  $0''.9$  и  $0''.7$  соответственно. ПЗС-камера с чипом TEC  $1\text{K} \times 1\text{K}$  обеспечивала поле зрения  $3' \times 3'$  при масштабе изображения  $0''.176$  пиксель $^{-1}$ .

#### 2.4.4. Данные 10-м телескопа Кеэк II

Наблюдения DDO 68 на телескопе Кеэк II были проведены в ночь 23 декабря 1997 г. на приборе LRIS (спектрометр низкого разрешения и камера) в фокусе Кассегрена  $f/15$  (Méndez et al., 2002). Использовался ПЗС-детектор Tektronix  $2048\text{K} \times 2048\text{K}$  с обратной засветкой с масштабом изображения  $0''.215$  пиксель $^{-1}$  и полем зрения  $6' \times 8'$ . Были получены изображения в  $V$ -полосе с экспозицией 600 с, при кружке рассеяния  $1''.0$  и воздушной массе 1.02.

#### 2.4.5. Данные 4-м телескопа KPNO

Снимки DDO 68 на 4-м телескопе KPNO получены 17 февраля 1998 г. в рамках программы из работы Hunter and Elmegreen (2006). Был использован ПЗС-детектор  $2\text{K} \times 2\text{K}$  Tektronix. Изображения получены с экспозициями 600 с в полосах  $B$  и  $V$  с кружком рассеяния  $2''.5$ . Масштаб изображения составлял  $0''.26$  пиксель $^{-1}$ .

#### 2.4.6. Данные 1.8-м телескопа VATT

Изображения DDO 68 на Ватиканском 1.8-м телескопе (VATT, подробнее см. в Taylor et al., 2005), расположенном в Международной обсерватории Маунт-Грэм (MGIO, Аризона, США), были получены 7 апреля 2000 г. с помощью детектора Direct Imager  $2\text{K} \times 2\text{K}$  с масштабом изображений  $0''.374$  пиксель $^{-1}$ . Времена экспозиции в фильтрах  $B$ ,  $V$ ,  $R$  составляли 600, 480, 360 с соответственно, при кружке рассеяния  $1''.5$ – $1''.8$ .

#### 2.4.7. Данные 2.1-м телескопа KPNO

Изображения DDO 68 на 2.1-м телескопе KPNO (Izotov and Thuan, 2009) были получены в фильтрах SDSS  $g$  и  $i$  9 февраля 2007 г. Время экспозиции для обоих фильтров составляло  $3 \times 600$  с.

Таблица 1. Журнал наблюдений DDO 68 на телескопах САО и КГО

Дата	Полоса	$T_{\text{exp}}$ , с	Телескоп	$\beta$ , угл. сек.	Дата	Полоса	$T_{\text{exp}}$ , с	Телескоп	$\beta$ , угл. сек.
12.01.2005	<i>V, R</i>	1800, 1800	БТА	1.7	03.02.2019	<i>V</i>	3600	1-м	1.6
21.01.2009	<i>V</i>	300	БТА	1.3	26.10.2019	<i>B, V, R</i>	600, 600, 600	БТА	1.2
14.01.2015	<i>B, V, R</i>	300, 360, 360	БТА	2.1	25.11.2019	<i>V</i>	3600	1-м	1.6
07.03.2016	<i>V</i>	4200	1-м	2.1	19.01.2020	<i>R</i>	1200	БТА	1.2
08.03.2016	<i>B, V, R</i>	1200, 1200, 1200	1-м	2.1	20.01.2020	<i>B, V</i>	600, 600	БТА	1.5
07.04.2016	<i>V</i>	4200	1-м	2.2	04.03.2020	<i>V, R</i>	2400, 1500	1-м	1.7
17.05.2016	<i>V</i>	4200	1-м	2.2	26.04.2020	<i>R</i>	600	БТА	2.0
22.10.2016	<i>V</i>	3600	1-м	1.8	11.11.2020	<i>V, R</i>	600, 900	БТА	1.5
24.11.2016	<i>B, V, R</i>	3600, 3600, 3600	1-м	1.9	14.05.2021	<i>V</i>	2400	1-м	2.0
24.12.2016	<i>V</i>	3600	1-м	2.6	16.05.2021	<i>R</i>	1200	1-м	2.0
31.12.2016	<i>V</i>	5400	1-м	1.6	02.12.2021	<i>V, R</i>	720, 720	БТА	1.6
18.04.2017	<i>V</i>	1500	КГО	1.7	26.04.2022	<i>V</i>	3000	1-м	1.7
29.05.2017	<i>V</i>	1200	1-м	1.7	25.10.2022	<i>V, R</i>	2700, 1500	1-м	2.5
16.11.2017	<i>B, V, R</i>	600, 600, 600	БТА	1.9	20.12.2022	<i>B, V, R</i>	720, 720, 720	БТА	1.8
19.02.2018	<i>V</i>	1800	КГО	1.8	25.12.2022	<i>B, V, R</i>	1500, 3600, 2700	1-м	2.2
05.04.2018	<i>B, V, R</i>	2100, 2400, 3900	1-м	1.8	23.01.2023	<i>B, V, R</i>	3600, 3600, 3600	1-м	2.1
30.04.2018	<i>V, R</i>	2400, 2400	1-м	1.7	18.03.2023	<i>V</i>	2700	1-м	1.9
11.10.2018	<i>V</i>	3300	1-м	1.6	12.10.2023	<i>V</i>	3600	1-м	1.7
18.01.2019	<i>R</i>	1800	КГО	1.0	22.10.2023	<i>V</i>	900, 900	БТА	1.9

Таблица 2. Сводка архивных данных для DDO 68

Дата	Телескоп	Полоса	$T_{\text{exp}}$ , с	$\beta$ , угл. сек.	Дата	Телескоп	Полоса	$T_{\text{exp}}$ , с	$\beta$ , угл. сек.
14.02.1988	3.5-м САО	<i>B, R</i>	900, 600	1.1	16.04.2004	2.5-м АРО	<i>g, r, i</i>	57, 57, 57	1.4
02.05.1994	2.54-м INT	<i>R</i>	1200	1.9	09.02.2007	2.1-м KPNO	<i>g, i</i>	1800, 1800	0.9
07.02.1995	2.56-м NOT	<i>B, V</i>	300, 300	0.9	02.05.2010	2.6-м HST	<i>V, I</i>	7644, 7644	0.1
23.12.1997	10-м Keck II	<i>V</i>	600	1.0	05.03.2011	0.9-м KPNO	<i>B, V, R</i>	900, 600, 420	1.4
17.02.1998	4-м KPNO	<i>B, V</i>	600, 600	2.5	17.02.2013	0.9-м KPNO	<i>B, V, R</i>	1200, 1200, 1200	1.9
07.04.2000	1.8-м VATT	<i>B, V, R</i>	600, 480, 360	1.7					

Изображения получены при воздушной массе около 1.05 и кружке рассеяния 0".9. Использовался ПЗС-детектор Tektronix 2К × 2К с масштабом 0".27 пиксель<sup>-1</sup>. Полученные величины в фильтрах

*g* и *i* были преобразованы в величины в *V*-полосе с помощью соотношений из работы Lupton (2005).

2.4.8. Данные 2.6-м телескопа HST

Изображения на космическом телескопе HST были получены 30 апреля 2010 г. в полосе *F814W* и

2 мая 2010 г. в полосе  $F606W$  в рамках программы ID GO 11578 (PI A. Aloisi). Использовалась камера ACS (Advanced Camera for Surveys). Обработка данных и фотометрия для области 3 уже описаны в работе Pustilnik et al. (2017). Для остальных областей 3O вся апертурная фотометрия проводилась аналогично, с теми же диаметрами апертуры, что и для наземных наблюдений. Относительно большие ошибки для величин в полосе  $V$ , составляющие  $0^m.08$ , связаны с ошибками преобразования из величин в фильтрах HST в величины  $V$ -полосы Джонсона–Казинса. Для конкретного изображения HST, из которого мы получаем величины в фильтре  $V$ , эта среднеквадратичная «ошибка» преобразования приводит к одинаковому систематическому сдвигу для всех областей. Если величина такого сдвига сравнима с амплитудой реальной переменности около  $0^m.1$ , это может проявляться на кривых блеска областей как коррелированные подъемы или спады.

#### 2.4.9. Данные 0.9-м телескопа KPNO

Наблюдения DDO 68 на 0.9-м телескопе Национальной обсерватории Китт-Пик проводились 5 марта 2011 г. и 17 февраля 2013 г. в полосах  $B$ ,  $V$  и  $R$  (Cook et al., 2014). Мы не нашли публикаций, связанных с данными наблюдениями. Использовался ПЗС-детектор S2KB размером  $2048 K \times 2048 K$ , установленный в фокусе телескопа с отношением  $f/7.5$ . Размер поля составлял около  $20'$  по одной стороне при масштабе  $0''.6$  пиксель $^{-1}$ .

#### 2.5. Детали фотометрии

Чтобы получить полные величины областей 1–6 в «Северном кольце» галактики DDO 68, мы использовали программы на командном языке MIDAS<sup>1</sup>, с помощью которых была проведена стандартная фотометрическая обработка: вычитание байеса, выравнивание плоского поля и коррекция освещенности. Фон аппроксимировался двумерным полиномом 2-й степени. При аппроксимации использовались данные о яркостях 80 областей вокруг «Северного кольца», полученные в малых апертурах, общая площадь которых близка к площади кольца. В последующих оценках ошибок интегральных величин областей 3O мы пренебрегаем компонентой темнового тока и шумом считывания, поскольку они во много раз меньше вклада пуассоновского шума от фона неба и объекта. Если стандартное отклонение

Пуассоновского процесса с отсчетами  $N^2$  — это  $\sqrt{N}$ , относительная погрешность потока от объекта (здесь области 3O вместе с фоном неба) записывается как  $\sqrt{N_{\text{sky+obj}}}/N_{\text{obj}}$ , где  $N_{\text{sky}}$  — количество отсчетов неба в пределах используемой апертуры,  $N_{\text{sky+obj}}$  — количество отсчетов неба вместе с объектом. Отсчеты от объекта можно получить следующим образом:  $N_{\text{obj}} = N_{\text{sky+obj}} - N_{\text{sky}}$ . Вычитание  $N_{\text{sky}}$ , аппроксимируемое вышеуказанным полиномом, увеличивает стандартное отклонение Пуассона для сигнала в апертуре объекта всего на несколько процентов.

Соответствующие инструментальным величинам  $m_{\text{inst}} = -2.5 \lg(N_{\text{obj}})$  ошибки  $\sigma_{\text{inst}}$ , предполагая, что они малы, мы определяли как

$$\sigma_{\text{inst}} = 2.5 \lg(1 + \sqrt{N_{\text{sky}} + N_{\text{obj}}}/N_{\text{obj}}). \quad (1)$$

Для фотометрии областей 1–6 в DDO 68 мы использовали локальные стандарты. Преобразование инструментальных звездных величин в видимые в соответствующих фильтрах базировалось на нуль-пунктах, определенных для каждого изображения по измерениям пяти и более локальных стандартов. Эти достаточно яркие звезды ( $g = 17^m.9 - 21^m.1$ ) были отобраны на изображениях SDSS-обзора неба (SDSS DR7; Abazajian et al., 2009) в непосредственной близости от DDO 68 так, чтобы они попадали в типичные поля зрения наших изображений ( $6'$  и более угловых минут в поперечнике). Их звездные величины  $g, r, i$  были измерены независимо с помощью апертурной фотометрии и преобразованы в звездные величины  $B, V, R$  Джонсона–Казинса по соотношениям из работы Lupton (2005). Локальные звездные стандарты представлены в таблице 3, где даны их названия в SDSS, звездные величины в фильтрах  $g, r, i$  и принятые  $B-, V-, R$ -величины в системе Джонсона–Казинса.

Апертуры для фотометрии локальных стандартов имели радиусы от  $2''.1$  до  $3''.1$  и были выбраны так, чтобы минимизировать вклад локальных слабых соседних звезд. Соответствующие небольшие поправки к асимптотическому значению величины, зависящие от качества изображений, вводились аналогично тем, что применялись для исследуемых областей 3O. Для определения этих поправок мы брали исходные изображения HST и сглаживали их с помощью фильтра Гаусса для получения изображений с кружком рассеяния от  $1''.0$  до  $2''.5$ . В каждом случае для получения полной звездной величины изучаемых областей использовались круговые апертуры фиксированных диаметров, указанные в таблице 4.

<sup>1</sup>MIDAS — это аббревиатура пакета программ Европейской южной обсерватории (англ. Munich Image Data Analysis System)

<sup>2</sup> $N$  — количество электронных отсчетов детектора, то есть количество ADU, умноженное на «gain».

**Таблица 3.** Сводка параметров для локальных стандартов

SDSS имя	SDSS $g, r, i$ , mag	$B, V, R$ , mag	$\sigma_g, \sigma_R, \sigma_i$ , mag
J095633.91+284953.9	21.08, 20.45, 20.01	21.50, 20.71, 20.23	0.03, 0.03, 0.04
J095635.72+285042.6	20.54, 20.18, 20.16	20.87, 20.32, 20.02	0.03, 0.03, 0.03
J095639.60+285202.4	19.66, 18.21, 17.47	20.34, 18.82, 17.85	0.01, 0.01, 0.01
J095639.81+285207.7	19.09, 17.93, 17.51	19.67, 18.42, 17.62	0.01, 0.01, 0.01
J095643.53+284747.6	18.66, 18.09, 17.84	19.06, 18.33, 17.87	0.01, 0.01, 0.01
J095646.63+284928.3	17.91, 17.22, 16.98	18.36, 17.51, 17.00	0.01, 0.01, 0.01
J095648.62+284854.3	20.81, 19.70, 19.17	21.38, 20.16, 19.40	0.02, 0.02, 0.02
J095649.01+284911.2	20.35, 19.03, 18.24	20.98, 19.58, 18.68	0.02, 0.01, 0.01
J095649.51+285236.6	20.59, 20.34, 20.04	20.90, 20.44, 20.20	0.03, 0.03, 0.04
J095650.57+284950.1	20.66, 19.20, 18.35	21.34, 19.81, 18.83	0.02, 0.01, 0.01
J095652.10+285041.6	21.77, 20.64, 19.07	22.38, 21.12, 20.32	0.05, 0.04, 0.02
J095656.49+284911.7	18.99, 18.64, 18.56	19.33, 18.78, 18.47	0.01, 0.01, 0.01

**Таблица 4.** Параметры областей ЗО 1–6

Область	Координаты центра (J2000)	Диаметр апертуры**, arcsec	$V_{med}$ , mag	$\delta V$ , mag
Knot 1	J095646.73+285008.9	10.0	18.41	0.09
Knot 2	J095646.69+285020.8	8.0	19.61	0.13
Knot 3*	J095646.25+285023.5	5.0	20.00	0.30
Knot 4	J095645.60+285015.9	11.0	18.72	0.11
Knot 5	J095646.15+285009.9	4.4	19.10	0.08
Knot 6	J095646.78+284954.8	6.0	19.44	0.16

\* $\delta V$  в период после гигантского извержения LBV. \*\* Соответствует видимым размерам ЗО (см. рис. 1).

### 2.6. Оценки величины ошибок фотометрии

В разделе 4 мы проводим статистическую проверку нулевой гипотезы об отсутствии переменности в фотометрических временных рядах для областей ЗО в DDO 68. Эти тесты основаны на ошибках измерений в предположении, что мы имеем их правильные оценки и все систематические и неслучайные факторы исключены. Мы кратко описываем процедуру оценки погрешностей и обозначаем проблемы, которые потенциально могли бы повлиять на погрешности фотометрии.

Основным преимуществом нашей фотометрии было использование нескольких локальных стандартов, что позволило нам определить нуль-пункты (как средневзвешенное значение по нескольким стандартам) для каждого измерения. Ошибки этих взвешенных средних в  $V$ -диапазоне составляют

от  $0^m002$  до  $0^m016$  с медианным значением около  $0^m007$ . При этом  $3/4$  из них составляют менее  $0^m012$ . Эта оценка ошибки нуль-пункта была квадратично суммирована с относительной ошибкой измеренного потока для соответствующих областей ЗО. Ошибки нуль-пунктов в  $B$ -полосе составляют от  $0^m002$  до  $0^m023$ , при этом медианная ошибка составляет  $0^m008$ . Аналогично для  $R$ -полосы ошибки нуль-пунктов находятся в пределах от  $0^m002$  до  $0^m018$  с медианой  $0^m008$ .

Как упоминалось в разделе 2.5, относительная погрешность измеренного потока определяется вкладом пуассоновского шума, показанным под  $\sqrt{N}$  в формуле (1). Для всех областей ЗО член  $N_{sky}$  больше, чем  $N_{obj}$ , в 3–10 раз в  $B$ -полосе, в 5–10 раз в  $V$ -полосе и в 15 раз в  $R$ -полосе. Поэтому вклад объекта в пуассоновский шум обычно меньше чем 10–20%.

Вычитание фона неба, аппроксимированного двумерным полиномом, как описано выше, увеличивает стандартное отклонение на результирующем изображении лишь на несколько процентов. В связи с этим мы не учитывали это небольшое добавление шума.

При типичном времени экспозиции в одном фильтре на БТА, равном 10 минутам, для области 3 — самой слабой из всех шести областей ЗО (см. таблицу 4) — величины  $N_{\text{sky}}$  составляют  $3.6 \times 10^5$ ,  $5.6 \times 10^5$  и  $1.1 \times 10^7$  в полосах  $B$ ,  $V$  и  $R$  соответственно. Значения отсчетов  $N_{\text{obj}}$  в полосах  $B$ ,  $V$  и  $R$  равны  $1.3 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^5$  и  $6.6 \times 10^5$ . Типичные погрешности инструментальных величин  $\sigma_{\text{inst}}$  достигают соответственно  $0^{\text{m}}006$ ,  $0^{\text{m}}009$  и  $0^{\text{m}}006$  в тех же полосах.

Для наблюдений на 1-м телескопе САО, с типичной экспозицией 60 минут, значения  $N_{\text{sky}}$  равны  $4.8 \times 10^5$ ,  $7.5 \times 10^5$  и  $1.8 \times 10^6$  в полосах  $B$ ,  $V$  и  $R$  соответственно. Значения  $N_{\text{obj}}$  в полосах  $B$ ,  $V$  и  $R$  составляли  $5.5 \times 10^4$ ,  $7.0 \times 10^4$  и  $6.5 \times 10^4$ . Соответствующие им типичные ошибки  $\sigma_{\text{inst}}$  достигают  $0^{\text{m}}014$ ,  $0^{\text{m}}013$  и  $0^{\text{m}}024$  в тех же полосах.

Значения нуль-пунктов принимались как средневзвешенные по всем доступным локальным стандартам на изображении. Фактически это ошибки взвешенных средних. Для 1-м телескопа САО они находились в диапазоне от  $0^{\text{m}}010$  до  $0^{\text{m}}018$ , в зависимости от фильтра и ночи. Для изображений, полученных на 6-м телескопе, ошибки нуль-пунктов были вдвое меньше. Погрешности измерения видимых звездных величин для областей ЗО 1–6 вычислялись как суммы квадратов стандартного отклонения пуассоновского шума и ошибок нуль-пунктов.

Мы выявили единственный фактор, приводящий к систематическому занижению потоков в областях ЗО. В зависимости от величины кружка рассеяния  $\beta$  небольшая часть общего потока от области ЗО теряется при фотометрии с апертурой фиксированного размера. Чтобы оценить эту долю потерянного потока и сделать соответствующую коррекцию, проводятся следующие процедуры. Мы берем изображения DDO 68, полученные на HST в декабре 2017 г. (программа 14716, PI: F. Annibali) в фильтре  $F606W$ , и выполняем для них сглаживающие фильтры Гаусса с помощью процедуры `MIDAS filter/gauss`. При этом мы получаем изображения с кружками рассеяния  $\beta$ , соответствующими тем, которые были на изображениях, полученных с помощью наземных телескопов.

Далее мы сравниваем результаты апертурной фотометрии с фиксированными размерами апертуры для несглаженных и сглаженных изображений. Исходя из полученных результатов, мы оцениваем

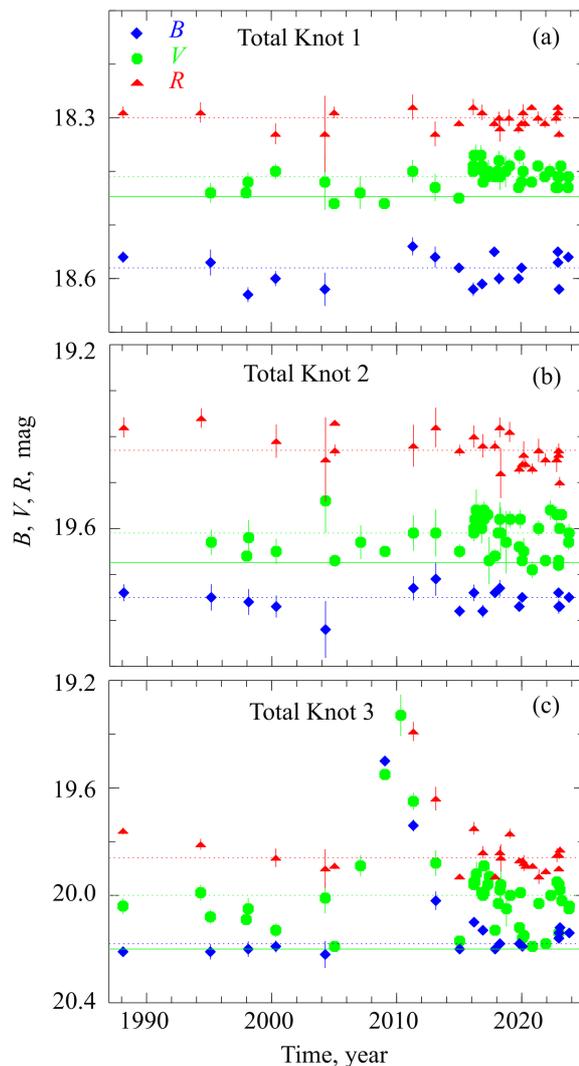


Рис. 2. Панели (a), (b), (c): кривые блеска в полосах  $B$ ,  $V$ ,  $R$  для 1, 2, 3 областей ЗО. Для удобства пунктирными линиями показаны медианные значения.

поправки для измеренных величин каждой области ЗО с соответствующим размером апертуры, в зависимости от кружка рассеяния. Эти поправки больше для меньших апертур. Они варьируются от  $0^{\text{m}}01$ – $0^{\text{m}}02$  для  $\beta = 1''0$ – $1''2$  до  $0^{\text{m}}04$  для  $\beta = 1''9$  и до  $0^{\text{m}}06$  для  $\beta = 2''2$ , достигают  $0^{\text{m}}07$  для нескольких изображений с  $\beta = 2''5$ . Эти поправки были применены к каждой оценке величины в таблице 5 (см. дополнительные материалы).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 4 мы кратко суммируем результаты фотометрии всех шести областей ЗО в полосе  $V$ , для которой получены наиболее многочисленные данные, включая их медианные величины и оцененные амплитуды переменности. Более продвинутый

**Таблица 5.** Сводка наших оценок общей величины  $B, V, R$  для областей звездообразования 1–6 в DDO 68. Даты приведены в формате YYYY.MM.DD. Информация о телескопах и методах, использованных для оценки величин, дана в колонке «Примечания». Показан фрагмент таблицы; полная версия доступна в Дополнительных материалах

Дата	$B, \text{mag}$	$\sigma_B, \text{mag}$	$V, \text{mag}$	$\sigma_V, \text{mag}$	$R, \text{mag}$	$\sigma_R, \text{mag}$	Примечания
Region Knot 1							
1988.02.14	18.56	0.011	–	–	18.29	0.011	CA 3.5-m
1994.05.02	–	–	–	–	18.29	0.019	INT 2.54-m
1995.02.07	18.57	0.024	18.44	0.019	–	–	NOT 2.56-m
1997.12.23	–	–	18.44	0.007	–	–	Keck II
1998.02.17	18.63	0.014	18.42	0.018	–	–	KPNO 4-m

анализ возможной переменности и ее параметров представлен в разделе 4.

Полученные кривые блеска для всех шести областей ЗО в фильтрах  $B, V, R$  представлены на рис. 2 и 3 и обсуждаются в разделе 5. На рис. 4–9 мы показываем кривые блеска остаточного света для каждой области в  $V$ -полосе, то есть разность минимального значения и наблюдаемой величины. Эти остаточные кривые блеска для двух временных интервалов дают возможность видеть переменность на различных временных масштабах.

В таблице 5 (см. дополнительные материалы) представлены данные индивидуальных измерений в каждом фильтре ( $B, V$  и  $R$ ) с учетом коррекции за эффект потерь света, попадающего в апертуру, при разных кружках рассеяния  $\beta$ . Это описано в разделе 2.6.

#### 4. ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ

Для области 3 вне временного интервала гигантского извержения, обсуждавшегося в работах Pustilnik et al. (2017) и Perepelitsyna and Pustilnik (2017), переменность с амплитудой около  $0^m.3$  вполне очевидна и не требует специальных тестов. Что касается остальных областей ЗО, то их переменность блеска значительно менее выражена. Поэтому необходимо с помощью известных тестов проверить, указывает ли наблюдаемый разброс измеренных звездных величин на реальную переменность или же они согласуются с разбросом, обусловленным принятыми ошибками наблюдений.

Как видно из таблицы 5, по разным причинам количество данных для фотометрии в полосе  $V$  существенно больше, чем в  $B$ - и  $R$ -фильтрах. Поэтому, учитывая примерно одинаковую точность фотометрических измерений в разных диапазонах, поиск возможной переменности разумно начать с набора данных в  $V$ -полосе.

##### 4.1. Методы поиска переменности блеска

В обзоре Sokolovsky et al. (2017) представлено сравнение различных методов обнаружения фотометрической переменности в данных временных рядов при поиске переменных звезд. Далее мы используем два метода из этого обзора.

Первый из них — широко известный  $\chi^2$ -тест. Исходя из опубликованных «критических» значений  $\chi^2$ -распределения и количества наблюдаемых данных (при условии, что измеренные данные имеют гауссово распределение), он позволяет четко определить уровень достоверности, при котором может быть отвергнута нулевая гипотеза об отсутствии переменности. Здесь статистика  $\chi^2$  — это  $\Sigma(x_i - m_w)^2 / \sigma_i^2$ , где  $\sigma_i^2$  являются дисперсиями  $x_i$ , для которых подразумевается гауссово распределение и  $m_w = \Sigma(x_i / \sigma_i^2) / \Sigma(1 / \sigma_i^2)$  — средневзвешенное значение  $x_i$ .

Второй метод использует так называемую робастную медианную статистику (RoMS,  $\eta$ ) (Epoch et al., 2003; Rose and Hintz, 2007), где  $\eta = \Sigma|x_i - \text{median}(x_i)| / \sigma_i$ . Редуцированная RoMS ( $\bar{\eta}$  с  $N - 1$  степенями свободы) определяется следующим образом:

$$\bar{\eta} = (N - 1)^{-1} \times \Sigma|x_i - \text{median}(x_i)| / \sigma_i.$$

Для этого метода не существует опубликованных теоретических распределений и соответствующих «критических» значений для различных уровней достоверности. Как отмечается в работе Epoch et al. (2003), если значения  $x_i$  представляют собой постоянную величину, ожидаемое значение  $\bar{\eta}$  меньше единицы. Значение  $\bar{\eta} > 1$  указывает на вероятную переменность. Чтобы оценить ее количество авторы провели тысячу симуляций Монте-Карло для выборок данных, представляющих постоянное значение со случайным шумом. Они принимали значения  $\bar{\eta}_{95}$ ,  $\bar{\eta}_{98}$  и  $\bar{\eta}_{99}$ , для которых соответственно 95, 98 и 99% реализаций

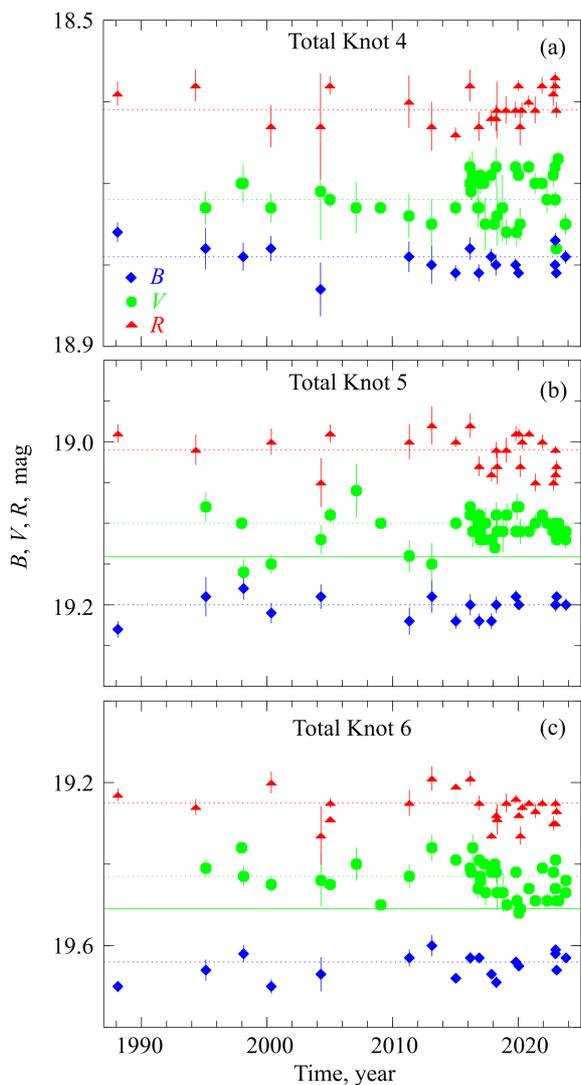


Рис. 3. Панели (а), (b), (с): кривые блеска для областей ЗО 4, 5, 6, аналогичные тем, что на рис. 2. Пунктирные линии показывают медианные значения величины для каждой полосы. Сплошные линии для полосы  $V$  показывают принятые минимальные уровни. Они определены так, чтобы соответствовать максимально возможному количеству точек на этом уровне яркости.

имели  $\bar{\eta}$  меньше этих «критических» значений  $\bar{\eta}$ . Из данных таблицы 2 в работе Epoch et al. (2003) следует, что «критическое» значение  $\bar{\eta} = 1.2$  было превышено только в 10 случаях из 1000. Следовательно, можно рассматривать этот уровень  $\bar{\eta}$  как критическую точку для отклонения нулевой гипотезы о «непеременных сигналах» на уровне достоверности  $\alpha = 0.01$  или, другими словами, свидетельство обнаружения переменности с вероятностью  $P = 1 - \alpha = 0.99$ . В дальнейшем метод был успешно протестирован на огромных массивах данных в работах Rose and Hintz (2007) и Burdanov et al. (2014). Хотя для гауссовского распределения ошибок метод RoMS является менее мощным, чем

$\chi^2$  тест (в смысле доверительной вероятности для данной кривой блеска), его использование может служить в качестве независимой проверки предполагаемой переменности.

#### 4.2. Результаты проверок возможной переменности

В верхней части таблицы 6 для областей 1, 2, 4, 5, 6 приведены оценки для статистики  $\chi^2$  и связанные с ними вероятности переменности и аналогичные данные для статистики редуцированного RoMS  $\bar{\eta}$ . Здесь оценки статистик даны для номинальных погрешностей, приведенных в таблицах с результатами фотометрии для отдельных областей ЗО. Краткое обсуждение возможного эффекта занижения ошибок наблюдений представлено в конце этого раздела.

В таблице 6 мы приводим для исследуемых областей диапазоны величин  $m_i$  (исключая точки низкой точности на краях диапазона), средневзвешенные величины  $m_w$ , средневзвешенную ошибку среднего  $\sigma_w = \sqrt{N}/\Sigma(1/\sigma_i^2)$ , взвешенное среднеквадратичное отклонение относительно взвешенного среднего  $\text{rms}_w$  и связанную с ним величину  $\chi^2 = \Sigma(x_i - m_w)^2/\sigma_i^2$ , медианное значение всех  $m_i$  и редуцированный параметр RoMS  $\bar{\eta} = (\Sigma|m_i - \text{median}(m_i)|/\sigma_i)/(N - 1)$ . Для всех областей ЗО количество наблюдений в  $V$ -полосе составляет  $N = 43$ .

В последних двух столбцах представлены вероятности  $P = 1 - \alpha$  отклонения нулевой гипотезы об отсутствии переменности исследуемых выборок согласно критерию  $\chi^2$  и по величине статистики  $\bar{\eta}$ . В случае  $\chi^2$ -теста это основано на критических точках  $\chi^2$ -распределения для соответствующих значений вероятности, взятых из таблицы 2.2а в книге Bol'shev and Smirnov (1983). Что касается вероятностей, основанных на статистике  $\bar{\eta}$ , мы принимаем результаты моделирования, представленные в работе Epoch et al. (2003).

Как видно из верхней части таблицы 6, видимая амплитуда переменности блеска находится в интервале от  $0^{\text{m}}08$  (область 5) до  $0^{\text{m}}16$  (область 6), с промежуточными амплитудами  $0^{\text{m}}09$ ,  $0^{\text{m}}13$  и  $0^{\text{m}}11$  для областей 1, 2 и 4 соответственно. Взвешенное среднеквадратичное отклонение  $\text{rms}$  для разных областей варьируется от  $0^{\text{m}}016$  и  $0^{\text{m}}046$ . Для номинальных значений погрешностей измерений обе статистики,  $\chi^2$  и  $\bar{\eta}$ , оказываются достаточно большими для всех пяти областей, так что уровни значимости  $\alpha$  для отклонения нулевой гипотезы составляют  $0.0005$  для  $\chi^2$  и  $0.01$  для  $\bar{\eta}$ .

Этот результат выглядит несколько неожиданным. Поэтому стоит обсудить вопрос о том, насколько надежны выводы о переменности рассматриваемых областей. Мы полагаем, что наблюдаемые изменения блеска отражают реальные процессы, то есть внутренние изменения плюс шумовой сигнал, присущий методике измерений. Таким образом, мерой значимости переменности в обоих тестах,  $\chi^2$  и  $\bar{\eta}$ , является усредненное отношение характерной амплитуды переменности к типичной погрешности измерения.

Поэтому если мы из-за неполного понимания природы ошибок измерений недооцениваем их, то в результате получаем завышенные значения как  $\chi^2$ , так и  $\bar{\eta}$  и, в свою очередь, более высокие уровни значимости обнаружения переменности. Чтобы проверить, насколько устойчивы выводы о вероятной переменности, мы увеличиваем все ошибки измерений на фактор 1.41 и 2.0. Первый случай примерно соответствует ситуации, при которой мы дважды учитываем пуассоновский шум в апертуре для измеряемой области. Для случая занижения ошибок на фактор 2.0 мы суммируем результаты в нижней части таблицы 6. Для промежуточного случая при факторе 1.41 вероятность переменности, основанная на  $\chi^2$ ,  $P > 0.9995$  для всех областей, кроме области 5, для которой это значение равно 0.995. Соответственно, вероятность переменности, основанная на статистике  $\bar{\eta}$ , составляет  $P \geq 0.99$  для всех областей ЗО, кроме области 5, для которой она составляет 0.90.

Как видно, при недооценке ошибок на фактор 1.41 вероятность отклонения нулевой гипотезы существенно падает только для области 5. Для остальных четырех областей переменность проявляется с высокой достоверностью. Даже для случая недооценки ошибок на фактор 2 выводы о переменности областей 4 и 6 остаются надежными. Для области 2 переменность становится менее достоверной, в то время как переменность блеска в областях 1 и 5 становится незначимой.

### 4.3. Кривые блеска переменных компонентов

Поучительно посмотреть на кривые блеска анализируемых областей с более высоким контрастом после вычитания излучения непостоянного компонента. Такие кривые могут давать указания на амплитуду переменности и ее временные масштабы для изучаемых объектов, а также на тип соответствующих звезд.

Для всех областей (кроме области 3) мы оценили уровень непостоянной подложки, взяв несколько точек с минимальной яркостью и оценив их средневзвешенное значение и разброс вокруг него. Принятые минимальные величины в полосе  $V$  приведены в подписях к соответствующим графикам

на рис. 4–9. Эти кривые блеска даны в двух временных интервалах (1995–2023 и 2015–2023 гг.) для того, чтобы лучше визуально различать вариации на более длинных и более коротких временных масштабах. Минимальная яркость показана на всех кривых блеска сплошной линией при  $\delta V = 0$ . Мы дополнительно проводим для каждого графика пунктирную линию, соответствующую медианной величине за весь период.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

### 5.1. Переменность звезды DDO 68-V1

Переменность LBV в DDO 68 (DDO 68-V1 в области 3), включая переменность спектральных характеристик и вариации ее оптической светимости, уже обсуждалась во многих работах (например, Izotov and Thuan, 2009; Perepelitsyna and Pustilnik, 2017; Pustilnik et al., 2017, 2008; Guseva et al., 2022). Ее основными особенностями являются отсутствие в излучении каких-либо линий металлов, в то время как наблюдаемые балмеровские линии водорода и линии He I показывают профили P Cygni с типичными лучевыми скоростями, большими или равными  $800 \text{ км с}^{-1}$ . Что касается изменений блеска, то эта звезда была обнаружена в фазе гигантского извержения в период 2008–2011 гг., когда ее абсолютная величина в полосе  $V$  приближалась к  $M_V \sim -10^m$ . Полная амплитуда ее переменности оценивалась примерно в  $4^m$ . Поскольку до гигантского извержения LBV более-менее регулярных наблюдений этого объекта не было, представляемый здесь мониторинг был нацелен, в частности, на изучение поведения кривой блеска LBV после такого редкого события.

Спектральный мониторинг области 3 в 12 эпохах в течение 2008–2018 гг. был недавно представлен в работе Guseva et al. (2022). В частности, за время своих десятилетних наблюдений они обнаружили для этой LBV изменение потока у широкой компоненты линии  $H\alpha$  в тысячу раз. Два последних их измерения, в апреле 2016 и апреле 2018 г., получены с интервалом в нескольких дней после наших наблюдений блеска этой области. В апреле 2016 г. поток широкой компоненты линии  $H\alpha$  был в 20 раз ниже своего максимального значения вблизи пика гигантского извержения, тогда как в апреле 2018 г. он был ниже уровня обнаружения, то есть как минимум еще в несколько раз меньше. Наша кривая блеска области 3 в эти эпохи (см. таблицу 5 в Дополнительных материалах и рис. 6) согласуется с падением блеска LBV после гигантского извержения до глубокого минимума в 2015 г., с последующими эпизодическими максимумами, имитируя вариации так называемого типа S Dor. Последние спектральные наблюдения LBV

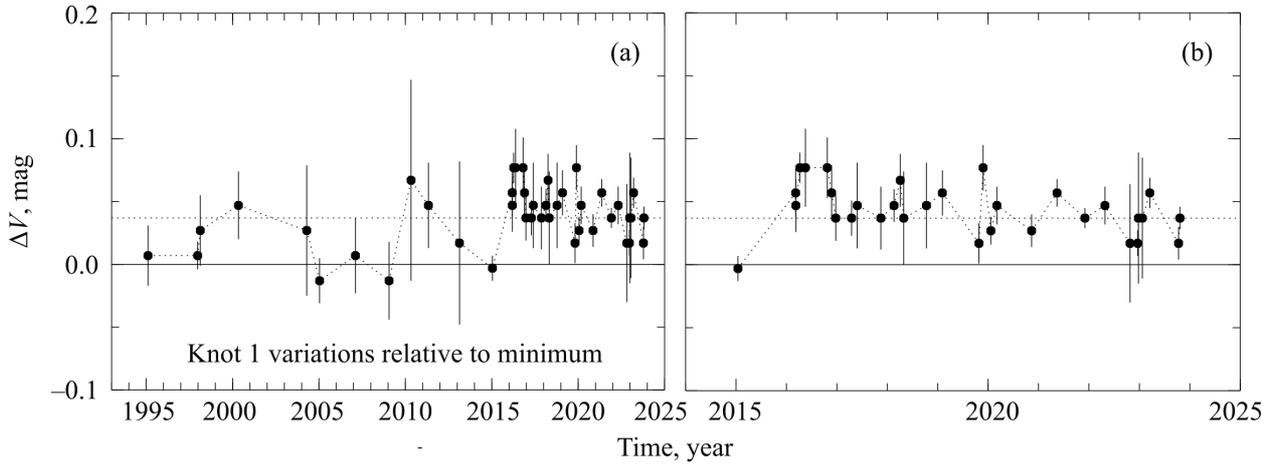


Рис. 4. Кривые блеска «переменного» компонента области 1 (относительно его минимального уровня яркости  $V = 18^m 447$ ) в полосе  $V$  для двух временных интервалов: 1995–2023 гг. (a) и 2015–2023 гг. (b).

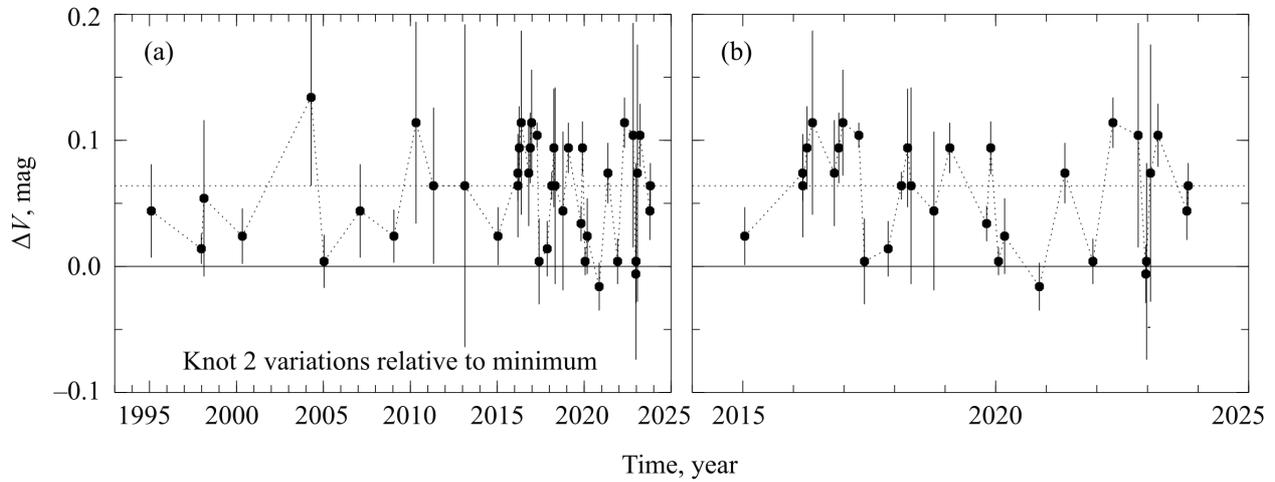


Рис. 5. Кривые блеска «переменного» компонента области 2 (относительно его минимального уровня яркости  $V = 19^m 674$ ) в полосе  $V$  для двух временных интервалов: 1995–2023 гг. (a) и 2015–2023 гг. (b).

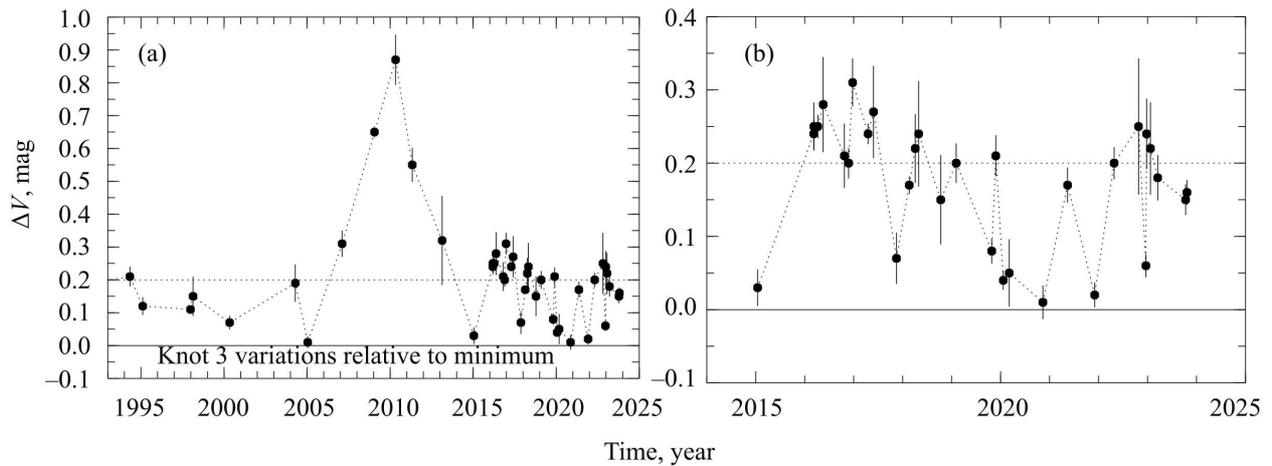


Рис. 6. Кривые блеска «переменного» компонента области 3 (относительно его минимальной яркости  $V = 20^m 20$ ) в полосе  $V$  для двух временных интервалов: 1995–2023 гг. (a) и 2015–2023 гг. (b).

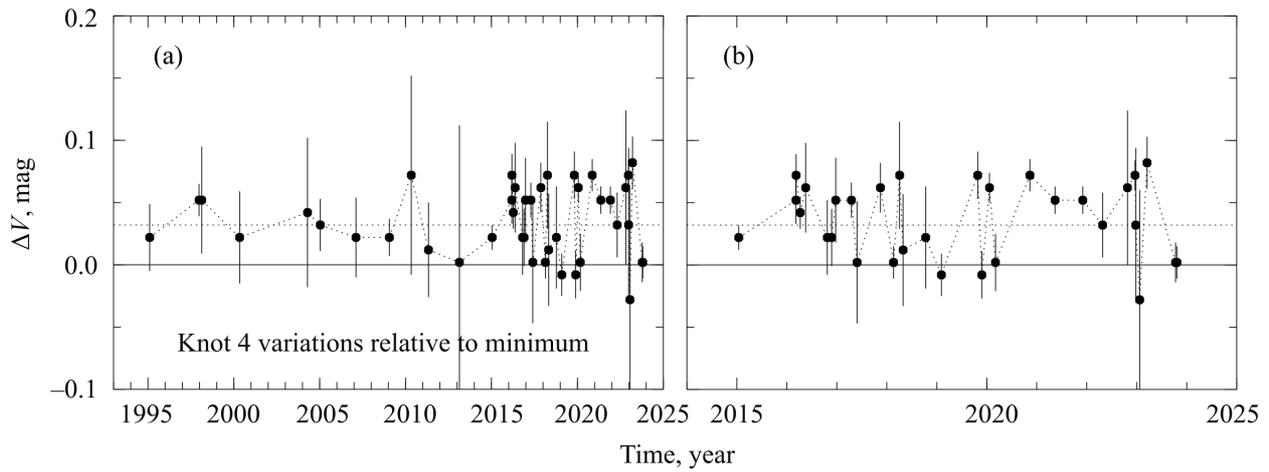


Рис. 7. Кривые блеска «переменного» компонента области 4 (относительно его минимальной яркости  $V = 18^m 775$ ) в полосе  $V$  для двух временных интервалов: 1995–2023 гг. (а) и 2015–2023 гг. (б).

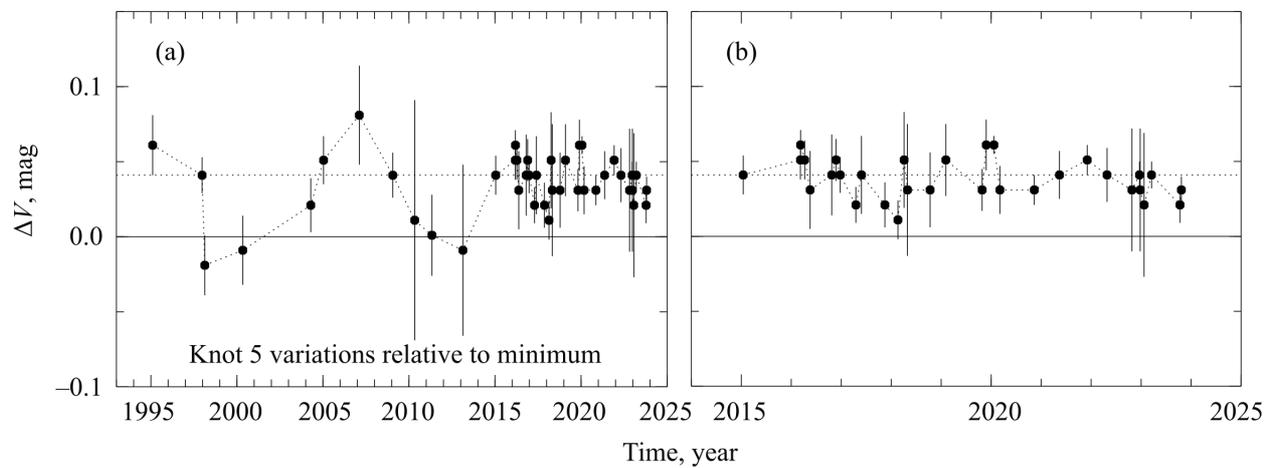


Рис. 8. Кривые блеска «переменного» компонента области 5 (относительно его минимальной яркости  $V = 19^m 141$ ) в полосе  $V$  для двух временных интервалов: 1995–2023 гг. (а) и 2015–2023 гг. (б).

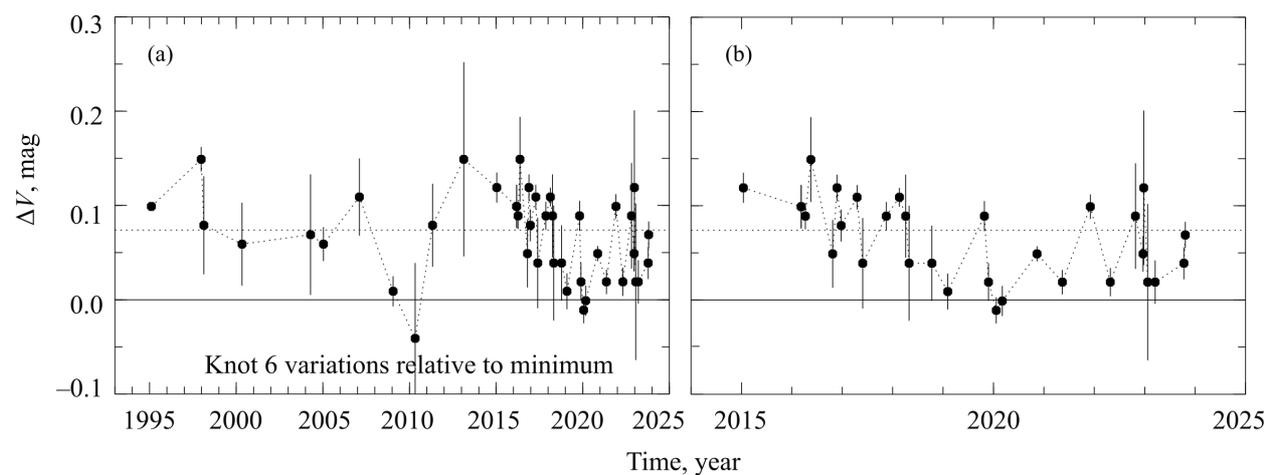


Рис. 9. Кривые блеска «переменного» компонента области 6 (относительно его минимальной яркости  $V = 19^m 509$ ) в полосе  $V$  для двух временных интервалов: 1995–2023 гг. (а) и 2015–2023 гг. (б).

**Таблица 6.** Статистические параметры переменности излучения областей 1, 2, 4, 5, 6. В столбцах таблицы содержится следующая информация: (2) — полный диапазон вариаций блеска в  $V$ -полосе; (3) — средневзвешенная  $V$ -величина; (4) — средневзвешенное значение ошибок  $\sqrt{(N)/\Sigma (1/\sigma_i^2)}$ ; (5) — среднеквадратичное значение  $\text{rms}$  относительно средневзвешенного; (6) — величина статистики  $\chi^2$ ; (7) — медианное значение  $V$ -величины; (8) — значение статистики  $\bar{\eta}$ ; (9) — вероятность «переменности»  $P = 1 - \alpha$ , основанная на статистике  $\chi^2$ ; (10) — аналогичная вероятность, основанная на статистике  $\bar{\eta}$ . См. детали в разделах 4 и 5.2. Для всех областей число наблюдений  $N_{\text{obs}} = 43$

Область	$V$ , mag	$V_{\text{mean},w}$ , mag	$\sigma_w$ , mag	$\text{rms}_w$ , mag	$\chi^2$	$V_{\text{med}}$ , mag	$\bar{\eta}$	Вероятность «переменности»	
								для $\chi^2$	для $\bar{\eta}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
В случае номинальных ошибок									
Кnot 1	18.37–18.46	18.413	0.009	0.021	229	18.41	1.70	>0.9995	>0.99
Кnot 2	19.56–19.69	19.622	0.016	0.040	270	19.61	2.02	>0.9995	>0.99
Кnot 4	18.67–18.78	18.713	0.012	0.029	290	18.72	2.05	>0.9995	>0.99
Кnot 5	19.08–19.16	19.103	0.009	0.016	151	19.10	1.47	>0.9995	>0.99
Кnot 6	19.36–19.52	19.441	0.012	0.046	641	19.44	2.85	>0.9995	>0.99
В случае ошибок, превышающих номинальные в 2 раза									
Кnot 1	18.37–18.46	18.413	0.009	0.021	57	18.41	0.85	0.90	...
Кnot 2	19.56–19.69	19.622	0.016	0.040	67	19.61	1.01	0.99	0.90
Кnot 4	18.67–18.78	18.713	0.012	0.029	72	18.72	1.03	0.995	0.90
Кnot 5	19.08–19.16	19.103	0.009	0.016	38	19.10	0.74	...	...
Кnot 6	19.36–19.52	19.441	0.012	0.046	160	19.44	1.43	>0.9995	>0.99

оказались близкими по времени к таким локальным максимумам. Поведение потока широкой компоненты  $N\alpha$  указывает на то, что это может быть проявлением сильно угасшей оболочки, возникшей после гигантского извержения. Более детальное описание и анализ данных области 3 и полученных кривых блеска для DDO 68-V1 мы переносим в отдельную статью, подготовленную к печати.

### 5.2. Переменность других областей звездообразования

Для проверки возможностей интегральной фотометрии наиболее бедных металлами областей ЗО в данной работе мы используем все доступные изображения DDO 68 для поиска новых переменных сверхгигантов, сформировавшихся из газа с наименьшей известной металличностью. Этот вариант был предложен Pustilnik et al. (2017) для наземных телескопов, расположенных в обсерваториях с наилучшими условиями, включая астроклимат с наименьшими кружками рассеяния. Конечно, чем меньше кружок рассеяния в такого рода программах мониторинга, тем проще выделять индивидуальные переменные сверхгиганты. Однако

описанные ниже результаты показывают, что такая программа может быть (частично) выполнена при менее жестких требованиях для кружка рассеяния, если точность фотометрии, частота и временной интервал мониторинга оптимизированы для ожидаемых параметров искомой переменности.

Для области 1 результаты наших статистических тестов указывают на наличие вариаций ее блеска в полосе  $V$  в диапазоне  $18^{\text{m}}37$ – $18^{\text{m}}46$ , с медианой  $V_{\text{Kn.1,med}} = 18^{\text{m}}41$ . Как видно по данным в таблице 6, обнаружение переменности является уверенным, но несколько менее надежным в случае (потенциально) заниженных ошибок измерений по сравнению с областями 6, 4 и 2. Мы проводим предварительное рассмотрение возможных звезд, которые могут быть ответственны за наблюдаемую амплитуду вариаций блеска  $\delta V_{\text{Kn.1}} \sim 0^{\text{m}}09$ . Две самые яркие звезды этой области, No. 13 и No. 18, согласно списку из работы Pustilnik et al. (2017), являются голубыми сверхгигантами (BSG) с измеренными (по изображениям, полученным на HST 2 мая 2010 г.) величинами в полосе  $V$ ,  $23^{\text{m}}81$  и  $24^{\text{m}}13$ , цветом  $(V - I) = -0^{\text{m}}09$  и  $-0^{\text{m}}21$ , абсолютными величинами  $M_V = -6^{\text{m}}77$  и  $-6^{\text{m}}45$

соответственно. Блеск в полосе  $V$  у звезды No. 13 примерно на  $5^m.4$  слабее, чем общий блеск области 1, что составляет всего 0.7%. Звезда No. 18 вносит в общий блеск в полосе  $V$  области 1 всего 0.5%. Наблюдаемые вариации блеска области 1 подразумевают очень сильные изменения в одном из этих двух голубых сверхгигантов или в обоих:  $\delta V_{\text{No.13}} \sim 3^m.0$  и  $\delta V_{\text{No.18}} \sim 3^m.3$ .

Такие большие амплитуды совершенно нетипичны для голубых сверхгигантов. Даже LBV во время так называемой стадии S Dog (нормальные извержения) показывают амплитуды на временной шкале в годы до  $2^m.5$  (например, van Genderen, 2001). Только для нескольких наблюдаемых LBV Млечного Пути, таких как  $\eta$  Car и P Cyg, а также ряда внегалактических LBV, таких как NGC 2363-V1 (Petit et al., 2006), LMC R127 (Walborn et al., 2008) и UGC 2773-OT (Smith et al., 2016), зарегистрированы так называемые гигантские извержения с амплитудами в четыре и более звездных величин. Аналогично события с большой амплитудой наблюдаются для ряда так называемых ложных сверхновых. Однако их связь с определенным типом массивных звезд пока не ясна.

Что касается данных по амплитудам, характерным для фазы S Dog, на уровне до  $2^m.5$ , то все они собраны по выборке относительно богатых металлами LBV в Млечном Пути, Магеллановых Облаках, M31 и других «богатых металлами» галактиках. Поэтому они могут быть нерепрезентативными для LBV с экстремально-низкими металлическими.

Фактически амплитуды переменности в фазе S Dog могут зависеть от металличности LBV. Пример DDO 68-V1 прямо указывает на такую возможность. Конечно, единственный уникальный случай переменности DDO 68-V1 не претендует на статистическую значимость. Однако прецедент обнаружения переменности типа S Dog с амплитудой до  $3^m.5$  (наша статья, подготовленная к печати) дает ясные указания на возможность более сильных вариаций блеска типа S Dog в экстремально низко-металлических LBV. Однако, чтобы быть уверенным, что наблюдаемая переменность согласуется с характерным поведением S Dog, то есть переменностью блеска с почти постоянной болометрической светимостью и связанными с этим изменениями цветов в зависимости от светимости (например, Solovyeva et al., 2019), требуется проанализировать многоцветные данные для широкого диапазона вариаций блеска DDO 68-V1.

Наконец, следует сказать о двух довольно ярких не звездообразных объектах ( $V \sim 21^m.3-21^m.5$ ) вблизи центра области 1. Это могут быть компактные области II, возбуждаемые горячими массивными звездами. Их вклад в общий свет области 1

может быть на порядок больше, чем у упомянутых выше BSG (No. 13 и 18). Следовательно, их требуемые амплитуды переменности будут меньше или порядка  $1^m$ . Однако такие объекты слишком яркие для звезд класса O на главной последовательности. Значит, можно ожидать, что эти области II возбуждаются «скоплением» массивных звезд. Поэтому их вклад менее вероятен в наблюдаемую переменность области 1.

Для области 2 имеющиеся данные в полосе  $V$  указывают на диапазон переменности от  $19^m.69$  до  $19^m.56$ . Следовательно, можно заподозрить вариации блеска с амплитудами около  $0^m.13$ . Данные в полосе  $R$  получались намного реже, однако они показывают близкую амплитуду, около  $0^m.10$ , с вариациями от  $19^m.46$  до  $19^m.36$ . Кривая блеска в полосе  $B$  еще более разрежена, и из-за больших ошибок в экстремумах нет никаких указаний на реальную переменность с амплитудой больше чем  $0^m.05$ . Две самые яркие звезды этой области — голубой сверхгигант No. 19 с  $V = 24^m.13$  и  $(V - I) = -0^m.21$  на эпоху снимков HST (02.05.2010) и красный сверхгигант No. 29 с  $V = 24^m.36$  и  $(V - I) = 1^m.41$ . Они вносят соответственно 1.5% и 1.2% от общего блеска области 2 в полосе  $V$ . Для вариаций блеска области 2 в  $V$ -полосе на уровне  $0^m.13$  амплитуда переменности этих звезд должна быть  $2^m.4-2^m.6$ .

Для области 4 переменность в полосе  $V$  (от  $18^m.67$  до  $18^m.78$ ) указывает на амплитуду  $\delta V \sim 0^m.11$ . В ней находится около 10 голубых и красных сверхгигантов с  $V$ -величинами от  $23^m.00$  до  $24^m.40$ , которые вносят вклад в интегральный свет области 4 от 1.8% до 0.3%. Следовательно, для вариаций  $\delta V = 0^m.11$  интегрального блеска области 4 амплитуда переменности отдельных звезд должна достигать  $1^m.8-3^m.7$ . При таком количестве кандидатов в сильно-переменные сверхгиганты необходимо больше данных высокой точности для отдельных звезд на снимках HST, чтобы попытаться соотнести вариации блеска области 4 с определенной звездой или несколькими звездами.

Для области 5 амплитуда вариаций блеска в полосе  $V$  не превышает  $0^m.08$ . Кроме собственно молодого звездного скопления, в апертуру при фотометрии попадают три близких сверхгиганта: No. 7, 21 и 42, с величинами в  $V$ -полосе от  $23^m.3$  до  $24^m.5$ , с вкладом в общий блеск внутри апертуры от 3.5% до 1%. Поэтому за видимые изменения блеска в апертуре области 5 отвечают либо переменность указанных сверхгигантов с амплитудами  $1^m.0-2^m.3$ , либо существенные вариации блеска массивных звезд внутри молодого скопления.

Для области 6 наиболее заметны вариации блеска в  $V$ -полосе с полным диапазоном от  $19^m.36$

до  $19^m52$ . Видны также частично коррелированные вариации блеска в полосах  $V$  и  $B$  в течение периода около 18 лет. Переменность в полосе  $R$ , несмотря на то что данные значительно более разрежены, также, похоже, происходит в фазе с изменениями в полосе  $V$ . На рис. 3с, где приводятся все три кривые блеска в полосах  $B$ ,  $V$ ,  $R$  для области 6, мы показали пунктирными линиями медианные значения для каждой полосы. Также сплошной линией показан предполагаемый уровень минимального блеска в полосе  $V$ .

Эти данные позволяют нам оценить полный диапазон вариаций блеска в полосах  $V$ ,  $B$  и  $R$  на уровне  $0^m16$ ,  $0^m10$ ,  $0^m10$  соответственно. Как первый вариант, мы предполагаем, что наблюдаемая переменность области 6 связана с изменениями блеска его ярчайшего сверхгиганта, отмеченного как No. 2 в списке самых ярких звезд, связанных с областями звездообразования с самым низким содержанием газа O/H (Pustilnik et al., 2017) в галактике DDO 68. Этот кандидат в желтый (теплый) гипергигант (YHG) (например, Humphreys et al., 2013), с  $V = 21^m47$  (по данным HST) и абсолютной величиной  $M_V = -9^m11$ , является второй по яркости звездой после DDO 68-V1 в ту эпоху (см. рис. 6 в работе Pustilnik et al., 2017).

На HST-снимке блеск этой звезды в полосе  $V$  составляет около 20.5% от полной яркости области 6 в пределах апертуры диаметром  $6''$ . Увеличение блеска на  $\delta V = 0^m16$  для области 6 соответствует увеличению яркости звезды No. 2 на  $0^m7$ , которая достигает абсолютной величины  $M_V \sim -9^m8$ . В соответствии с ее цветом по снимкам с телескопом HST,  $(V - I) = 0^m33$ , эта звезда высокой светимости в настоящее время классифицируется как желтый гипергигант (YHG). Хотя LBV-звезды большую часть времени являются голубыми, их эволюционные треки на диаграмме «температура–светимость» достигают области желтых гипергигантов. Поэтому их иногда можно встретить в этой фазе (например, van Genderen, 2001).

Кроме того, нельзя исключать, что на цвет звезды влияет околозвездная оболочка, которая часто видна вблизи проэволюционировавших массивных звезд (например, van Genderen, 2001; Kniazev et al., 2017). С учетом покраснения в оболочке, она может быть более голубой и относиться к гипергигантам класса A или даже B. Вероятно, спектроскопия среднего разрешения этой звезды, с ожидаемой  $V$ -величиной между  $21^m47$  и примерно  $20^m9$ , поможет лучше определить ее спектральный класс.

Можно также рассмотреть альтернативный вариант, при котором переменность блеска области 6 связана с переменностью более слабой звезды —

No. 11, голубого сверхгиганта с абсолютной величиной  $M_V = -7^m11$  и цветом  $(V - I) = -0^m11$ . Ее звездная величина в полосе  $V$ , равная  $23^m42$ , соответствует примерно 2.5% интегрального блеска области 6. Другие ярчайшие звезды, расположенные вокруг области 6, а именно No. 4, 10 и 17, находятся далеко за пределами апертуры диаметром  $6''$ , используемой для мониторинга потенциальной переменности Н II-области. Для переменности блеска области 6 с амплитудой  $0^m16$  эта звезда должна стать ярче примерно в семь раз или примерно на  $2^m1$ , достигнув абсолютной величины  $M_V \sim -9^m2$ . Таким образом, можно рассматривать этот В-сверхгигант как еще один кандидат в LBV в фазе переменности типа S Dor.

Из рассмотрения кривых блеска и таблиц с фотометрическими данными для отдельных областей 30 в DDO 68 можно оценить типичные временные масштабы значимой переменности (от минимума до максимума) блеска для тех областей, в которых статистический анализ указывает на достаточно высокую вероятность реальных вариаций. Эти характерные времена могут быть полезны для более детального анализа.

В частности, для области 6 (с самой сильной после области 3 переменностью) минимумы блеска в полосе  $V$  можно отметить вблизи эпох 2009.1, 2020.0 и 2023.2, тогда как максимальная яркость достигалась вблизи эпох 1998.0, 2015.0–2016.3. То есть типичная долговременная переменность звезды в этой области имеет характерные времена на уровне 2–5 лет от минимума до максимума и назад. Это важно иметь в виду при проверке потенциальной переменности ярких звезд на более коротких временных шкалах на изображениях, доступных в архиве HST. Таким образом, предполагаемые амплитуды самых ярких звезд в этих областях, которые на временных масштабах около двух лет можно обнаруживать на уровне  $0^m7$ – $3^m$ , на временной шкале в месяц будут составлять всего лишь  $0^m03$ – $0^m12$ .

Представленные выше анализ и обсуждение вариаций интегрального блеска для нескольких областей 30 в DDO 68 подразумевают, что обнаруженные амплитуды  $0^m08$ – $0^m16$  соответствуют повышению яркости их самых ярких сверхгигантов с  $V$ -величинами от  $23^m$ – $24^m$  (или  $V$  около  $21^m5$  для YHG в области 6) до уровней  $20^m5$ – $21^m5$ . Звездные объекты с такими величинами доступны для спектроскопии среднего разрешения с помощью наземных больших телескопов. При этом их вклад в общее излучение Н II-области, в которой они находятся, составляет не более 10–15%. Однако при оптимально расположенной длинной щели с шириной менее или равной  $1''$  контраст излучения звезды и «туманности» может возрасти в несколько раз. Таким образом, практическая рекомендация

по продолжению мониторинга «Северного кольца» включает спектральное сопровождение областей, которые удастся зарегистрировать в яркой фазе кривой блеска. Это позволит получить предварительную информацию о спектральных свойствах наиболее бедных металлами сверхгигантов и гипергигантов в их ярких фазах.

## 6. ВЫВОДЫ

Суммируя представленные результаты и приведенное выше обсуждение, мы приходим к следующим выводам:

1. Уникальная LBV-звезда DDO 68-V1 была обнаружена в январе 2008 г. в галактике войда DDO 68, вблизи центра Н II-области 3, имеющей металличность газа, близкую к рекордно низкой:  $[12 + \lg(\text{O}/\text{H})] \sim 7.1$  dex. Опубликованная ранее кривая блеска области 3 в интервале 2005–2015 гг., в период, когда было открыто гигантское извержение этой LBV, была представлена в работе Pustilnik et al. (2017) и имела довольно редкое покрытие. В этой работе мы продолжаем ее кривую блеска до конца 2023 г., добавляя результаты фотометрии на трех телескопах, полученные для 35 эпох, а также используем архивные снимки с 10 других телескопов. Переменность блеска области 3 с амплитудой до  $0^{\text{m}}3$  в течение последних восьми лет тщательно регистрировалась. Кривая блеска для самой LBV и ее обсуждение будут представлены в статье, подготовленной к печати.
2. Помимо области 3, наши снимки покрывают еще пять областей ЗО в так называемом «Северном кольце» в DDO 68. В этих областях обнаружено много сверхгигантов, каталогизированных в работе Pustilnik et al. (2017). В принципе, часть из них может испытывать большие вариации блеска. Такая переменность сверхгигантов проявилась бы как «небольшие» изменения в общем блеске этих областей. Аналогично случаю области 3 мы выполнили фотометрию для пяти остальных областей ЗО, а также провели статистический анализ выборки их наблюдаемых величин, чтобы проверить, согласуются ли эти данные с нулевой гипотезой об отсутствии переменности.
3. Использование критерия  $\chi^2$  и дополнительно робастной медианной статистики (RoMS) позволяет отвергнуть нулевую гипотезу на уровне значимости  $\alpha = 0.0005$  (для критерия  $\chi^2$ ) для областей 1, 2, 4, 5, 6. Их амплитуды переменности ( $\delta V$ ) составляют соответственно:  $0^{\text{m}}09$ ,  $0^{\text{m}}13$ ,  $0^{\text{m}}11$ ,  $0^{\text{m}}08$  и  $0^{\text{m}}16$ .

4. Обнаруженные вариации интегрального блеска областей ЗО объясняются естественным образом как проявления переменности их ярчайших сверхгигантов. Поскольку вклад отдельных сверхгигантов в суммарное излучение этих областей не превышает 1–10%, для объяснения видимых вариаций блеска областей ЗО соответствующие амплитуды переменности сверхгигантов должны достигать  $\delta V = 0^{\text{m}}7$ – $3^{\text{m}}5$ . При такой сильной переменности можно ожидать обнаружения в этих областях ЗО новых кандидатов в LBV. Если вариации блеска области 6 связаны с переменностью кандидата в теплые гипергиганты, их амплитуда не может превышать примерно  $0^{\text{m}}7$ .

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А. Валееву за помощь в наблюдениях на БТА, а также Л. ван Зее, Д. Хантер, Б. Элмерину, У. Хоппу, Л. Макаровой, Р. Суотерсу, Б. Мендесу, В. Тейлору, Р. Янсену, Р. Виндхосту, С. Одевану, Дж. Хиббарду за предоставление архивных ПЗС-изображений DDO 68, полученных для их программ наблюдений. Мы также благодарны П. Кайгородову и Д. Колмолейцеву за их помощь в извлечении данных с архивных лент. Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за тщательное прочтение рукописи и ценные замечания, которые помогли улучшить содержание статьи. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты». Мы выражаем признательность за частичную поддержку Программе развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Мы признательны за использование базы данных SDSS. Финансирование SDSS-обзора было предоставлено Фондом Альфреда П. Слоуна, участвующими институтами, Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства, Национальным научным фондом, Министерством энергетики США, стипендией Монбукагакушо правительства Японии и Обществом Макса Планка. Веб-сайт SDSS — <http://www.sdss.org/>. SDSS управляется Консорциумом астрофизических исследований (ARC) для участвующих институтов. Это исследование основано на наблюдениях, сделанных с помощью космического телескопа Хаббла NASA/ESA, полученных из Института науки космического телескопа, который управляется Ассоциацией университетов по исследованиям в области астрономии, Inc., по контракту NASA NAS 5-26555. Наблюдения связаны с программой ID GO 11578 (PI A. Aloisi).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Все обсуждаемые фотометрические данные для областей 1–6 приведены в таблице 5 в Дополнительных материалах в электронном виде.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182** (2), 543 (2009). DOI:10.1088/0067-0049/182/2/543
2. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005). DOI:10.1134/1.1883351
3. F. Annibali, V. La Torre, M. Tosi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (3), 3892 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty2911
4. R. Barkana and A. Loeb, *Physics Reports* **349** (2), 125 (2001). DOI:10.1016/S0370-1573(01)00019-9
5. D. A. Berg, E. D. Skillman, A. R. Marble, et al., *Astrophys. J.* **754** (2), article id. 98 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/754/2/98
6. L. N. Bol'shev and N. V. Smirnov, *Tables of Mathematical Statistics* (Nauka Publishers, Moscow, 1983).
7. A. Y. Burdanov, V. V. Krushinsky, and A. A. Popov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 368 (2014). DOI:10.1134/S1990341314030122
8. J. M. Cannon, M. Johnson, K. B. W. McQuinn, et al., *Astrophys. J.* **787** (1), article id. L1 (2014). DOI:10.1088/2041-8205/787/1/L1
9. Y. Chen, A. Bressan, L. Girardi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **452** (1), 1068 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv1281
10. D. O. Cook, D. A. Dale, B. D. Johnson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **445** (1), 881 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu1580
11. J. J. Eldridge and E. R. Stanway, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **60**, 455 (2022). DOI:10.1146/annurev-astro-052920-100646
12. M. L. Enoch, M. E. Brown, and A. J. Burgasser, *Astron. J.* **126** (2), 1006 (2003). DOI:10.1086/376598
13. M. Garcia, C. J. Evans, J. M. Bestenlehner, et al., *Experimental Astronomy* **51** (3), 887 (2021). DOI:10.1007/s10686-021-09785-x
14. M. Gull, D. R. Weisz, P. Senchyna, et al., *Astrophys. J.* **941** (2), id. 206 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/aca295
15. N. G. Guseva, Y. I. Izotov, and T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **531** (2), 776 (2000). DOI:10.1086/308489
16. N. G. Guseva, T. X. Thuan, and Y. I. Izotov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **512** (3), 4298 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac820
17. A. S. Hirschauer, N. Crouzet, N. Habel, et al., *Astron. J.* **168** (1), id. 23 (2024). DOI:10.3847/1538-3881/ad4967
18. U. Hopp and R. E. Schulte-Ladbeck, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **111**, 527 (1995).
19. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 1025 (1994). DOI:10.1086/133478
20. R. M. Humphreys, K. Davidson, S. Grammer, et al., *Astrophys. J.* **773** (1), article id. 46 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/773/1/46
21. D. A. Hunter and B. G. Elmegreen, *Astrophys. J. Suppl.* **162** (1), 49 (2006). DOI:10.1086/498096
22. Y. I. Izotov, C. B. Foltz, R. F. Green, et al., *Astrophys. J.* **487** (1), L37 (1997). DOI:10.1086/310872
23. Y. I. Izotov and T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **665** (2), 1115 (2007). DOI:10.1086/519922
24. Y. I. Izotov and T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **690** (2), 1797 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/690/2/1797
25. A. A. Kniazev and S. A. Pustilnik, *Proc. IAU Symp. No. 232*, Ed. by P. Whitelock, M. Dennefeld, and B. Leibundgut (Cambridge University Press, Cambridge, 2006), p. 306.
26. A. Y. Kniazev, V. V. Gvaramadze, and L. N. Berdnikov, *ASP Conf. Ser.* **510**, 480 (2017).
27. F. Legrand, D. Kunth, J. R. Roy, et al., *Astron. and Astrophys.* **326**, L17 (1997). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/9707279
28. C. Leitherer, D. Schaerer, J. D. Goldader, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **123** (1), 3 (1999). DOI:10.1086/313233
29. M. Lorenzo, M. Garcia, F. Najarro, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **516** (3), 4164 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac2050
30. R. H. Lupton, <https://www.sdss3.org/dr8/algorithms/sdssUBVRITransform.php#Lupton2005>
31. D. I. Makarov, L. N. Makarova, S. A. Pustilnik, and S. B. Borisov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **466** (1), 556 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw3145
32. L. N. Makarova and I. D. Karachentsev, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **133**, 181 (1998). DOI:10.1051/aas:1998315
33. F. Martins and A. Palacios, *Astron. and Astrophys.* **645**, id. A67 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039337
34. M. V. Maseda, Z. Lewis, J. Matthee, et al., *Astrophys. J.* **956** (1), id. 11 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/acf12b

35. B. Méndez, M. Davis, J. Moustakas, et al., *Astron. J.* **124** (1), 213 (2002). DOI:10.1086/341168
36. Y. A. Perepelitsyna and S. A. Pustilnik, *ASP Conf. Ser.* **510**, 484 (2017).
37. V. Petit, L. Drissen, and P. A. Crowther, *Astron. J.* **132** (5), 1756 (2006). DOI:10.1086/506512
38. B. Petrov, J. S. Vink, and G. Gräfener, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **458** (2), 1999 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw382
39. S. A. Pustilnik, E. S. Egorova, A. Y. Kniazev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (1), 944 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2084
40. S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, Y. A. Perepelitsyna, and E. S. Egorova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (1), 830 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa215
41. S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, and A. G. Pramskij, *Astron. and Astrophys.* **443** (1), 91 (2005). DOI:10.1051/0004-6361:20053102
42. S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, A. L. Tepliakova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **527** (4), 11066 (2024). DOI:10.1093/mnras/stad3926
43. S. A. Pustilnik, L. N. Makarova, Y. A. Perepelitsyna, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465** (4), 4985 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw3049
44. S. A. Pustilnik, Y. A. Perepelitsyna, and A. Y. Kniazev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463** (1), 670 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw2039
45. S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, A. Y. Kniazev, and A. N. Burenkov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **388** (1), L24 (2008). DOI:10.1111/j.1745-3933.2008.00492.x
46. M. B. Rose and E. G. Hintz, *Astron. J.* **134** (5), 2067 (2007). DOI:10.1086/522963
47. D. Sanyal, N. Langer, D. Szécsi, et al., *Astron. and Astrophys.* **597**, id. A71 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201629612
48. A. Schootemeijer, D. J. Lennon, M. Garcia, et al., *Astron. and Astrophys.* **667**, id. A100 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202244730
49. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev (Spec. Astrophys. Obs. RAS, Nizhnii Arkhyz, 2020), pp. 127–132.
50. E. D. Skillman, J. J. Salzer, D. A. Berg, et al., *Astron. J.* **146** (1), article id. 3 (2013). DOI:10.1088/0004-6256/146/1/3
51. N. Smith, J. E. Andrews, J. C. Mauerhan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455** (4), 3546 (2016). DOI:10.1093/mnras/stv2507
52. N. Smith and S. P. Owocki, *Astrophys. J.* **645** (1), L45 (2006). DOI:10.1086/506523
53. K. V. Sokolovsky, P. Gavras, A. Karamelas, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (1), 274 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw2262
54. Y. Solovyeva, A. Vinokurov, S. Fabrika, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (1), L24 (2019). DOI:10.1093/mnrasl/sly241
55. R. A. Swaters and M. Balcells, *Astron. and Astrophys.* **390**, 863 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20020449
56. D. Szécsi, N. Langer, S.-C. Yoon, et al., *Astron. and Astrophys.* **581**, id. A15 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201526617
57. V. A. Taylor, R. A. Jansen, R. A. Windhorst, et al., *Astrophys. J.* **630** (2), 784 (2005). DOI:10.1086/432028
58. O. G. Telford, K. B. W. McQuinn, J. Chisholm, and D. A. Berg, *Astrophys. J.* **943** (1), id. 65 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/aca896
59. A. M. van Genderen, *Astron. and Astrophys.* **366**, 508 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20000022
60. J. S. Vink, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **60**, 203 (2022). DOI:10.1146/annurev-astro-052920-094949
61. N. R. Walborn, O. Stahl, R. C. Gamen, et al., *Astrophys. J.* **683** (1), L33 (2008). DOI:10.1086/591525

**Monitoring of DDO 68 “Northern Ring” SF regions in 2016–2023**

S. A. Pustilnik<sup>1</sup>, Y. A. Perepelitsyna<sup>1</sup>, A. S. Vinokurov<sup>1</sup>, E. S. Egorova<sup>2,3</sup>, A. S. Moskvitin<sup>1</sup>, V. P. Goranskij<sup>2</sup>,  
A. N. Burenkov<sup>1</sup>, O. A. Maslennikova<sup>1</sup>, O. I. Spiridonova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

<sup>3</sup>Astronomical Computing Institute, Center for Astronomy of the University of Heidelberg, 69120 Germany

DDO 68 is a star-forming (SF) dwarf galaxy residing in a nearby void. Its gas metallicity is among the lowest known in the local Universe, with the  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  parameter in the range of 6.96–7.3 dex. Six of its SF regions are located in or near the so-called “Northern Ring”, in which the Hubble Space Telescope (HST) images reveal many luminous young stars. We present for these SF regions (Knots) the results of optical monitoring in 35 epochs during the years 2016–2023. The data was acquired with the 6-m (BTA) and 1-m telescopes of the Special Astrophysical Observatory, and the 2.5-m telescope of the MSU Caucasian Mountain Observatory. We complement the above results with the archival data from 10 other telescopes for 11 epochs during the years 1988–2013 and with three our BTA observations between 2005 and 2015. Our goal is to search for variability of these Knots and to relate it to the probable light variations of their brightest stars. One of them, DDO 68-V1 (in Knot 3), was identified in 2008 with a luminous blue variable (LBV) star born in the lowest metallicity environments. For Knot 3, variations of its integrated light in the previous epochs reached about 0<sup>m</sup>8. In the period since 2016, the amplitude of the variations in Knot 3 has reached about 0<sup>m</sup>3. For the rest of the Knots, due to the lower amplitudes, the manifestation of variability is less pronounced. We examine the presence of variability via the  $\chi^2$  criterion and the Robust Median Statistics and discuss the robustness of the detected variations. The variability is detected according to both criteria in the light curves of all Knots with the  $\chi^2$  confidence level at  $\alpha = 0.0005$ . The peak-to-peak amplitudes of the variations are approximately 0<sup>m</sup>09, 0<sup>m</sup>13, 0<sup>m</sup>11, 0<sup>m</sup>08, and 0<sup>m</sup>16 for Knots 1, 2, 4, 5, and 6, respectively. The amplitudes of the related variations of the brightest supergiants in these regions can reach about 3<sup>m</sup>0.

Keywords: *stars: massive—stars: variables: general—stars: individual (DDO 68-V1)—stars: metallicity—galaxies: individual: DDO 68 (UGC 5340, VV 542)*