

УДК 524.5-472:52-76

## АНАЛИЗ МЕЖЗВЕЗДНОГО ВЕЩЕСТВА НА ПЕРИФЕРИИ СВЕРХОБОЛОЧКИ ВОКРУГ АССОЦИАЦИИ Cyg OB1 В ЛИНИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА 2.12 МИКРОН

© 2023 Д. З. Вибе<sup>1\*</sup>, Т. Г. Ситник<sup>2</sup>, А. С. Расторгуев<sup>2,3</sup>,  
Т. А. Лозинская<sup>2</sup>, А. М. Татарников<sup>2</sup>, А. А. Татарникова<sup>2</sup>, А. П. Топчиева<sup>1</sup>,  
М. В. Заболотских<sup>2</sup>, А. А. Федотьева<sup>2</sup>, А. А. Татарников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

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

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119191 Россия

Поступила в редакцию 28 марта 2022 года; после доработки 5 мая 2023 года; принята к публикации 15 мая 2023 года

Представлены наблюдения окрестностей скопления vdB 130 в узкополосном фильтре с центром на линии молекулярного водорода 2.12 мкм, выполненные на Кавказской горной обсерватории МГУ имени М. В. Ломоносова. Мы обнаружили эмиссионную оболочку H<sub>2</sub> вокруг vdB 130, совпадающую с яркой инфракрасной оболочкой, видимой во всех диапазонах Spitzer. Кроме того, найдены многочисленные эмиссионные детали H<sub>2</sub> вокруг инфракрасных Пузырей E и W и в окрестностях протоскопления, расположенного к востоку от оболочки в хвосте кометного молекулярного облака. Эмиссия H<sub>2</sub> в окрестностях скопления vdB 130 в основном генерируется в хорошо развитых областях H II и носит флуоресцентный характер. В области протоскопления наблюдаются изолированные пятна, где эмиссия H<sub>2</sub> возбуждается столкновениями и, вероятно, связана с ударными волнами в протозвездных истечениях. Полученные результаты обсуждаются в контексте возможного последовательного звездообразования в окрестностях скопления vdB 130, вызванного взаимодействием расширяющейся сверхоболочки вокруг ассоциации Cyg OB1 с молекулярным облаком и связанным с ним молекулярным волокном.

Ключевые слова: МЗС: кинематика и динамика — МЗС: облака — МЗС: линии и полосы

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение массивного комплекса звездообразования в созвездии Лебедя имеет долгую историю и восходит к работе Vlaha and Humphreys (1989), авторы которой разделили выборку OB-звезд на пять больших групп в зависимости от их положения на небе. Одной из таких групп является известная звездная ассоциация Cyg OB1, включающая не менее 50 OB-звезд и окруженная большой расширяющейся сверхоболочкой размером  $3^\circ \times 4^\circ$  (Humphreys and McElroy, 1984). Эта статья завершает серию наших исследований звездообразования в области ( $\alpha = 20^{\text{h}}16^{\text{m}}-20^{\text{h}}18^{\text{m}}$ ,  $\delta = 39^\circ 15'-39^\circ 35'$ ), расположенной в окрестностях молодого погруженного скопления vdB 130 рядом со стенкой сверхоболочки — работы Sitnik et al. (2015, 2019, 2020), именуемые в дальнейшем Статьи I, II и III, и Tatarnikova et al. (2016)).

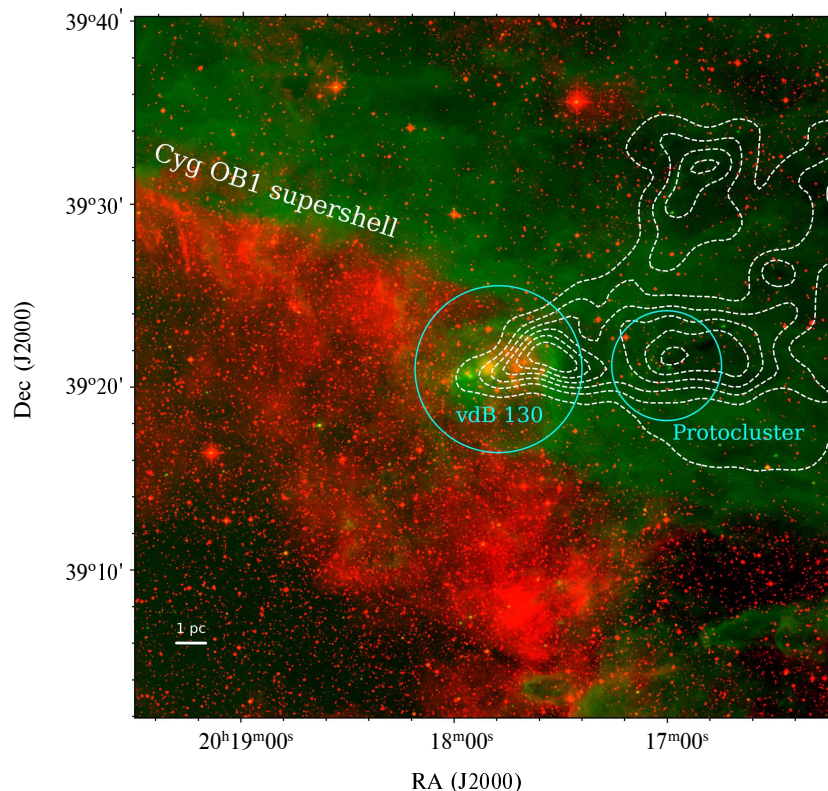
Общий вид этой области показан на рис. 1. Представлены совмещенные карты DSS2 red обзора Digitized Sky Survey<sup>1</sup> и 8 мкм-карты Spitzer<sup>2</sup> (красный и зеленый цвета соответственно), на которые наложены интегрированные контуры эмиссии <sup>13</sup>CO (1–0), очерчивающие молекулярное облако, исследованное в работе Schneider et al. (2007).

Кометное молекулярное облако, обозначенное как Cloud A в статье Schneider et al. (2007), выделяется в рассматриваемой части сверхоболочки (рис. 1). Используя выражения из Schneider et al. (1998), мы оценили его массу в  $3000 M_\odot$  в пределах уровня  $1 \text{ K} \times \text{км с}^{-1}$  (данные наблюдений были любезно предоставлены Н. Шнайдер). Также Schneider et al. (2007) обнаружили градиент

<sup>1</sup>[https://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss\\_form](https://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form)

<sup>2</sup><https://sha.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>

\*E-mail: [dwiebe@inasan.ru](mailto:dwiebe@inasan.ru)



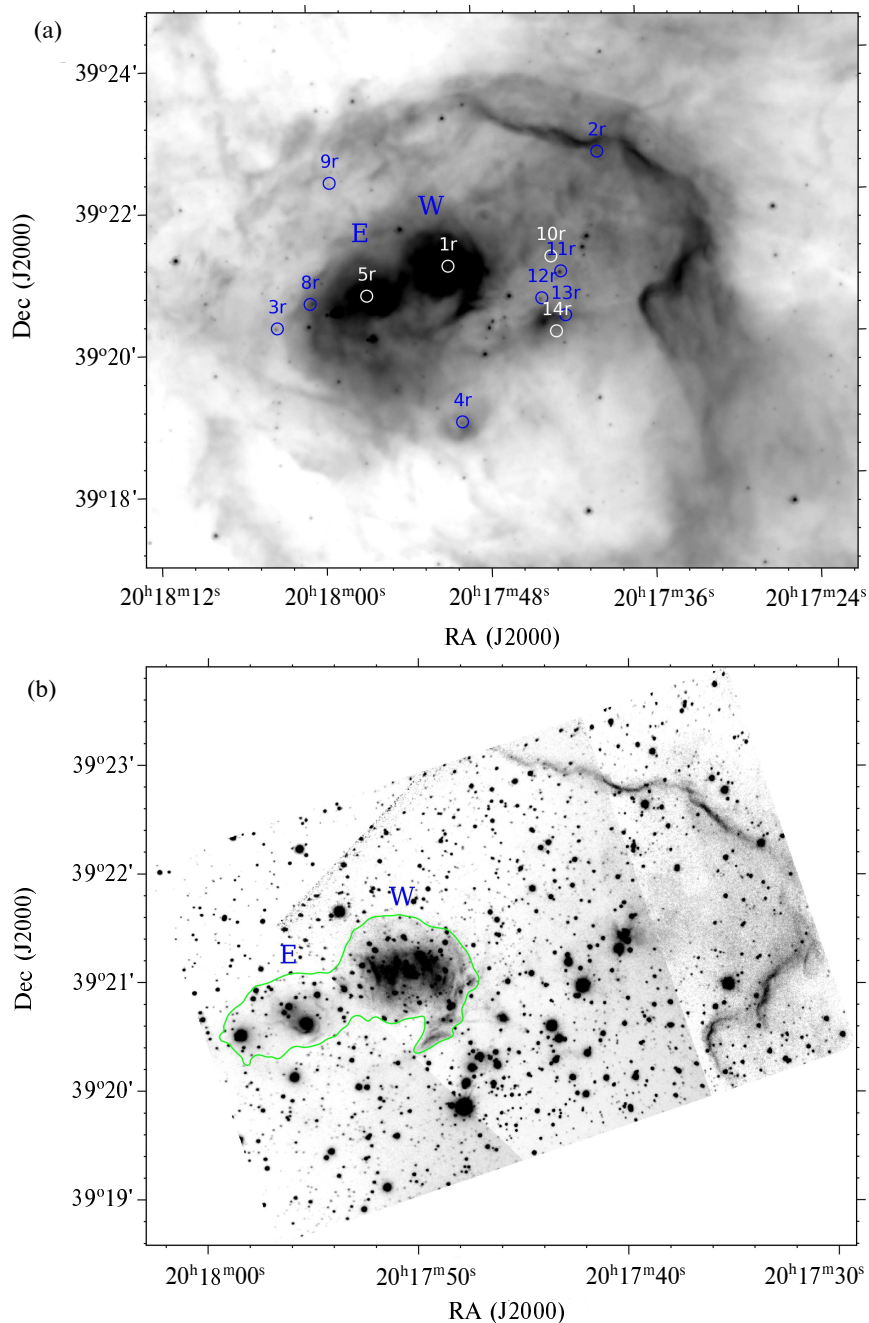
**Рис. 1.** Северо-западная часть сверхоболочки, окружающая звездную ассоциацию Cyg OB1. Комбинированные карты DSS2 red (красный) и Spitzer 8 мкм (зеленый) с наложенными на них контурами интегральной эмиссии  $^{13}\text{CO}$  (1–0), очерчивающими молекулярное облако (Schneider et al., 2007). Контурные линии проходят от  $1 \text{ K} \times \text{км с}^{-1}$  с шагом  $2 \text{ K} \times \text{км с}^{-1}$ . Кружками отмечены центральная часть скопления vdB 130 и область протоскопления. В левом нижнем углу указан масштаб, равный 1 пк для расстояния 1.67 кпк.

скорости  $0.5 \text{ км с}^{-1} \text{ пк}^{-1}$  вдоль большой оси облака и предположили, что Cloud A, скорее всего, сформировано УФ-излучением и звездным ветром от близких OB-звезд. Облако действительно вытянуто в направлении освещающего источника, то есть в сторону ближайших OB-звезд в Cyg OB1. Размер молекулярного облака составляет  $0.4$  или  $12 \text{ пк}$  при принятом расстоянии до скопления и ассоциации  $1.67 \pm 0.06 \text{ кпк}$  (Rastorguev et al., 2023).

Облако связано с двумя областями звездообразования. Первая область, молодое скопление vdB 130, расположена в голове облака (столбе), а другая — компактное протоскопление — в его хвосте (рис. 1, см. также рис. 11 в Статье II). Физическая связь ассоциации Cyg OB1, сверхоболочки, скопления vdB 130 и молекулярного облака следует из оценок расстояний и лучевых скоростей, а также из некоторых косвенных факторов (см. Статью I). Возраст vdB 130 не превышает 10 млн лет (Статьи I и III). Такая оценка согласуется с наличием протозвезд классов I и II (Kuhn et al., 2021), видимых как в области vdB 130, так и в области протоскопления.

Анализ межзвездного поглощения в направлении vdB 130 показал, что вещество переднего плана характеризуется нормальным законом поглощения с  $R_V = 3.1$  (Tatarnikova et al., 2016, Статья III). Внутри самого скопления поглощение очень значительно и неоднородно. По нашим данным и данным из работы Racine (1974) поглощение в направлении центральных звезд в Пузырях E и W (рис. 2a) может достигать величины  $R_V = 8$ . С запада скопление vdB 130 окружено ИК-оболочкой размером  $3 \text{ пк}$ , различимой во всех диапазонах IRAC и на  $24 \text{ мкм}$  MIPS-телескопа Spitzer (рис. 2a).

Одним из основных крупномасштабных движений межзвездного вещества в изучаемой области является расширение сверхоболочек под действием ветра и ионизирующего излучения звезд ассоциации Cyg OB1. Расширяющаяся сверхоболочка сжимает уже существующие молекулярные сгустки или сгустки, возникающие в выметенном веществе (см., например, работу Deharveng et al. (2005)). Скорость расширения сверхоболочки, определенная по анализу интерферометрических наблюдений в линии  $\text{H}\alpha$ , достигает в ряде направлений



**Рис. 2.** Изображения окрестностей vdB 130 в 8 мкм полосе Spitzer (a) и в линии молекулярного водорода ( $\lambda = 2.12$  мкм) (b). Инфракрасные Пузыри E и W вместе с несколькими звездами из исходного списка Racine (1974) помечены на панели (a). Приблизительные контуры Пузырей также показаны на панели (b).

$80 \text{ км с}^{-1}$  (Lozinskaya et al., 1998; Arkhipova et al., 2013).

Напрашивается предположение о том, что кометная форма молекулярного облака (с головой внутри сверхоболочки и хвостом вне ее), а также две области звездообразования (скопление vdB 130 и протоскопление) внутри головы и хвоста облака — все это признаки последовательного звездообразования, вызванного расширением

сверхоболочки (рис. 1, см. также Статьи II и III). Эта область подходит для выявления последствий такого расширения, так как расположена на периферии сверхоболочки, а предполагаемый процесс стимулированного звездообразования разворачивается в плоскости неба.

Некоторые аргументы в пользу последовательного звездообразования в этой области приводились в наших предыдущих исследованиях. Здесь

мы представляем результаты наших наблюдений окрестностей скопления vdV 130 и протоскопления в инфракрасном (ИК) фильтре с центром на линии молекулярного водорода  $\lambda = 2.12$  мкм, установленном на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ имени М. В. Ломоносова.

Эта линия довольно часто используется как инструмент для исследования физических условий в протозвездных истечениях и областях фотодиссоциации (photodissociation regions (PDR)). Будучи одной из самых ярких вращательно-колебательных линий  $H_2$ , она может возбуждаться двумя конкурирующими способами. В ударных волнах преобладает столкновительное возбуждение, тогда как для PDR более характерно радиационное возбуждение, где вещество облучается близкими массивными звездами. Из-за отсутствия информации о профиле линии в этой работе мы рассматриваем только морфологию эмиссии  $H_2$  и ее связь с другими маркерами.

Структура статьи следующая. В разделе 2 описаны аппаратура и методы обработки наблюдений в линии  $H_2$ , а также использованные архивные данные. В разделе 3 представлен анализ новых наблюдательных данных в окрестностях ИК-оболочки и протоскопления. Возможные проявления последовательного звездообразования, вызванного расширяющейся сверхоболочкой, обсуждаются в разделе 4. Итоги работы подведены в заключении.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Это исследование основано на ИК-наблюдениях, выполненных в период с 3 апреля по 1 сентября 2020 года с помощью инфракрасной камеры ASTRONIRCAM (Nadjip et al., 2017), которая установлена на 2.5-м телескопе (КГО ГАИШ МГУ). Качество изображений звезд FWHM варьировалось от  $0''.8$  до  $1''.2$ . Размер кадра камеры ASTRONIRCAM равен  $1024 \times 1024$  пикселей, что обеспечивает угловой размер  $0''.27/\text{пикселей}$  и поле зрения  $280'' \times 280''$ . Мы использовали два фильтра:  $H_2 v=1-0(S1)$  с  $\lambda_0 = 2.132$  мкм и  $FWHM = 0.046$  мкм, а также фильтр  $K_{cont}$  с  $\lambda_0 = 2.273$  мкм и  $FWHM = 0.039$  мкм. Первый центрирован на линию молекулярного водорода  $v=1-0(S1)$ , а второй позволяет измерять уровень континуума в соседней области спектра. Каждый итоговый кадр является суммой многих отдельных кадров с короткими экспозициями (около 9 с). Между этими кадрами телескоп сдвигался на угол около  $3''-5''$ . Полное время экспозиции для суммарных кадров составило от 910 до 3940 с. Фон неба измерялся отдельно при той же воздушной массе. Оценки поверхностной яркости и стандартные отклонения

итоговых кадров оценивались с использованием звезд из 2MASS для калибровки потока (Tatarnikov et al., 2023). Стандартные отклонения  $1.5 \times 10^{-17}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  пиксель $^{-1}$  для области оболочки,  $1.3 \times 10^{-17}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  пиксель $^{-1}$  для области пузырей и  $8.8 \times 10^{-18}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  пиксель $^{-1}$  для области протоскопления. Эти числа могут рассматриваться как верхние значения предела чувствительности для наших данных. Далее мы представляем данные в полосе фильтра  $H_2$  с вычитанием данных в фильтре  $K_{cont}$ , которое делалось при допущении, что в области спектра около 2 мкм континуум плоский.

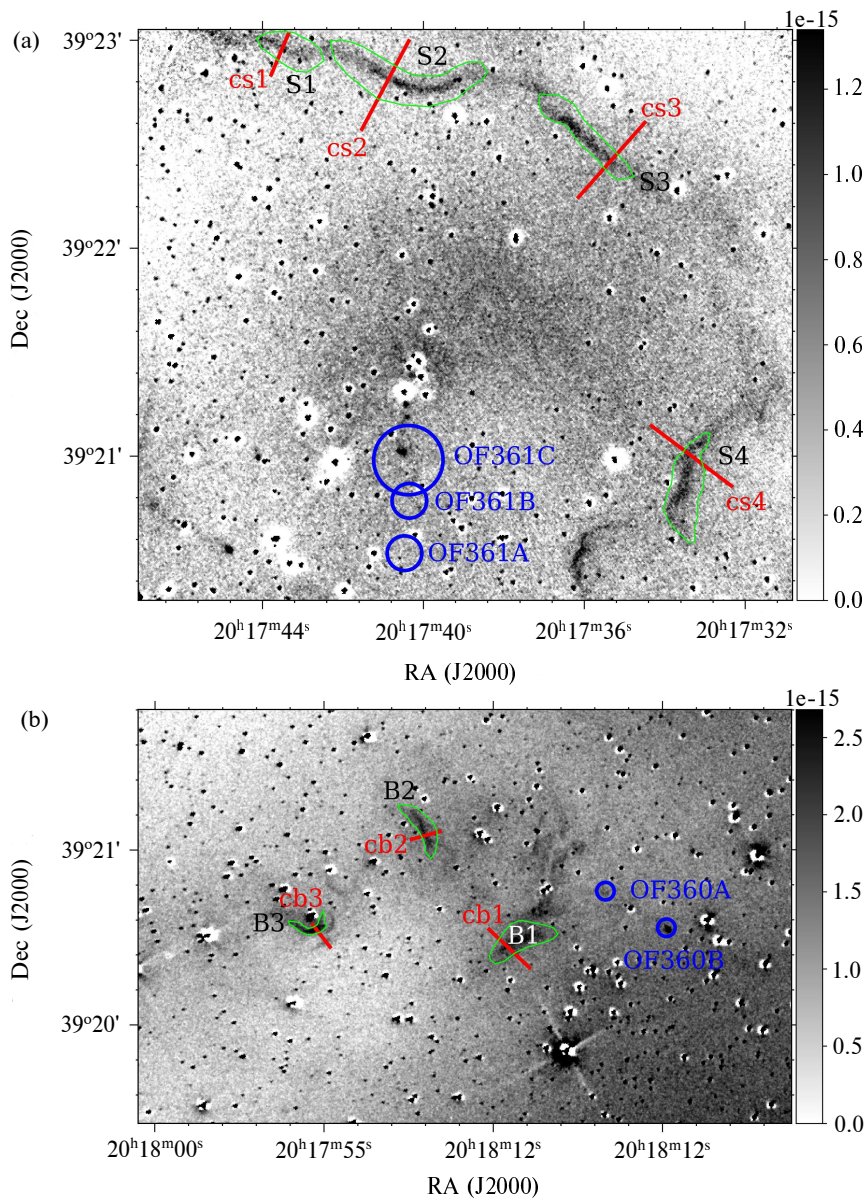
Межзвездное поглощение мы не учитываем. Хотя оно может играть важную роль на этих длинах волн (Habart et al., 2022), из-за сложной структуры поглощения в этой области его учет нетривиален. Мы полагаем, что его игнорирование на наши выводы не повлияет, так как нас больше всего интересует морфология эмиссии. Все рассмотренные данные были приведены к одной и той же астрометрической привязке, соответствующей данным  $H_2$ . В некоторых случаях, описанных ниже, была сделана свертка изображений  $H_2$  с разрешением данных Spitzer на 8 мкм ( $FWHM = 2''$  (Fazio et al., 2004)) с использованием фильтра Гаусса из работы Aniano et al. (2011).

Мы также используем наши  $H\alpha$ -наблюдения этой области, представленные в Статье I, и архивные данные Spitzer.

## 3. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ВОДОРОД В ОКРЕСТНОСТЯХ СКОПЛЕНИЯ vdV 130 И ПРОТОСКОПЛЕНИЯ

Эмиссия молекулярного водорода явно заметна в нескольких местах исследуемой области (рис. 2b). Она четко очерчивает инфракрасную оболочку вокруг скопления vdV 130, окружает инфракрасные пузыри, в частности Пузыри W и E, и выглядит как несколько компактных пятен в области протоскопления. На рис. 3a мы приводим карту излучения молекулярного водорода для окрестностей ИК-оболочки с вычетом континуума  $K_{cont}$ , выделяя четыре яркие эмиссионные детали  $H_2$ , обозначенные как S1, S2, S3, S4, а также четыре поперечных разреза (cs1, cs2, cs3, cs4), о которых речь пойдет ниже. На рис. 3b показаны детали (B1, B2, B3) и разрезы (cb1, cb2, cb3), выбранные для анализа в области пузырей.

Чтобы найти связь наблюдаемых величин друг с другом и с предполагаемыми морфологическими деталями области, мы используем код Cloudy (Ferland et al., 2017), позволяющий осуществить моделирование структуры области II и соседней области фотодиссоциации с очень детальным



**Рис. 3.** Эмиссия молекулярного водорода в районе vdB 130 ( $\text{эрг см}^{-2} \text{угл. сек.}^{-2}$ , линейный масштаб, континуум  $K_{\text{cont}}$  вычтен). (a) — область ИК-оболочки, (b) — область пузырей. Зеленые контуры и красные линии обозначают области и срезы, выбранные для детального анализа. Также указаны истечения OF360 и OF361, идентифицированные ранее Makin and Froebrich (2018).

учетом наиболее важных процессов. В частности, был рассчитан ряд моделей оболочки с центральной звездой, имеющей эффективную температуру 25 000 K (В-звезда,  $\lg g = 3.9$ ,  $\lg L/L_{\odot} = 3.7$ ) или 50 000 K (О-звезда,  $\lg g = 4.1$ ,  $\lg L/L_{\odot} = 6.1$ ). Соответствующие звездные модели были загружены с веб-сайта TLUSTY<sup>3</sup> (Lanz and Hubeny, 2007). Звезда находится на расстоянии  $d$  от внутренней границы моделируемой области, которая считается

однородной. Рассмотрены значения плотности  $10^3$  и  $10^4 \text{ см}^{-3}$ .

Результаты представлены в таблице 1. Первое число в обозначении модели (первый столбец таблицы 1) — это показатель степени плотности, затем следует буква, обозначающая спектральный класс ионизирующей звезды, и последнее число — расстояние  $d$  от звезды до внутреннего края расчетной области в парсеках. Так, например, модель 3B0.1 соответствует области с плотностью газа  $10^3 \text{ см}^{-3}$  и внутренним краем, расположенным на расстоянии 0.1 пк от В-звезды. Пример структуры

<sup>3</sup><http://tlusty.oca.eu/Tlusty2002/tlusty-frames-cloudy.html>

**Таблица 1.** Модели параметров структуры PDR. Обозначение модели включает экспоненту плотности, букву, соответствующую спектральному классу звезды, и расстояние (в парсеках) от звезды до внутренней границы моделируемой области

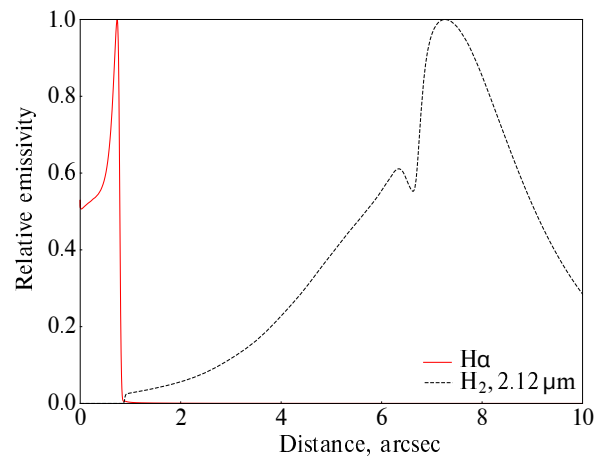
| Модель | $d$ , пк | $H_2$ 2.12 мкм—IF* | Ширина оболочки $H_2$ , угл. сек. |
|--------|----------|--------------------|-----------------------------------|
| (1)    | (2)      | (3)                | (4)                               |
| 3V0.1  | 0.1      | 35                 | 30                                |
| 3V0.3  | 0.3      | 30                 | 30                                |
| 4V0.1  | 0.1      | 6                  | 4                                 |
| 4V0.3  | 0.3      | 2                  | 2                                 |
| 3O0.1  | 0.1      | 30                 | 40                                |
| 3O0.3  | 0.3      | 40                 | 50                                |
| 3O1    | 1        | 60                 | 50                                |
| 3O3    | 3        | 50                 | 50                                |
| 3O10   | 10       | 10                 | 30                                |
| 4O0.1  | 0.1      | 7                  | 5                                 |
| 4O0.3  | 0.3      | 7                  | 5                                 |
| 4O1    | 1        | 7                  | 5                                 |
| 4O3    | 3        | 4                  | 3                                 |

Примечание: \*— IF означает «фронт ионизации».

теоретической оболочки для модели 4O1 показан на рис. 4. При этом край области Н II находится на расстоянии около  $0''.7$  от внутренней границы расчетной области. Поскольку геометрия распределения газа и пыли в районе vdB 130 далека от сферической, мы не пытаемся воспроизвести получающиеся спектры, полагаясь вместо этого на коэффициенты излучения как функции расстояния от источника ионизации. Это ограничивает доступные варианты рассмотрением взаимного расположения различных компонентов МЗС и корреляций между их соответствующими интенсивностями. Звезды были экранированы масками как в области оболочки, так и в области пузырей.

### 3.1. Инфракрасная оболочка

Четко различима эмиссия  $H_2$  от самой оболочки, а также диффузная эмиссия  $H_2$  на переднем и/или фоновом плане, проецирующаяся на область скопления. Пространственное расположение оболочки  $H_2$  совпадает с расположением филаментов на 8 мкм. Попиксельное сравнение эмиссии  $H_2$  и эмиссии 8 мкм для деталей S1–S4 представлено на рис. 5. Данные  $H_2$  были свернуты с разрешением данных Spitzer на 8 мкм. Мы видим, что



**Рис. 4.** Теоретические профили интенсивностей  $H\alpha$  и  $H_2$  поперек оболочки в области ионизированного водорода. Область ионизирована звездой O-типа, расположенной на расстоянии 1 пк от внутренней границы расчетной области (модель 4O1). Плотность газа в оболочке  $10^4 \text{ см}^{-3}$ .

интенсивность излучения молекулярного водорода коррелирует с интенсивностью излучения на 8 мкм для всех четырех деталей, что указывает на то, что именно УФ-излучение возбуждает как ПАУ<sup>4</sup>, так и молекулы водорода.

Наблюдаемые профили интенсивности вдоль срезов оболочки, отмеченных на рис. 3а, показаны на четырех панелях рис. 5. Здесь мы снова приводим данные  $H_2$ , которые были свернуты с разрешением данных Spitzer на 8 мкм. Видно, что пики эмиссии  $H_2$  и ПАУ практически совпадают и немного смещены относительно границы области Н II, которую мы несколько условно отождествляем с местом, где интенсивность  $H\alpha$  начинает уменьшаться. Это смещение порядка  $5''$ – $10''$ . Ширины эмиссионных оболочек 8 мкм и  $H_2$  подобны друг другу и равны  $3''$ – $5''$ .

Эти значения можно соотнести с результатами теоретического моделирования, представленными в таблице 1. Мы видим, что наблюдаемые геометрические ограничения в оболочке выполняются только в моделях с плотностью газа  $10^4 \text{ см}^{-3}$ . При такой плотности звезды O-типа дают ширины эмиссионных оболочек  $H_2$ , которые соответствуют наблюдаемым, как и удаленность оболочек от границ области Н II на всех рассматриваемых расстояниях. Звезда V-типа, расположенная далее чем 0.3 пк, генерирует слишком узкие оболочки и слишком близко к границе области Н II.

Таким образом, делаем вывод, что, несмотря на то что ИК-оболочка, по-видимому, окружает vdB 130, звезды скопления сами по себе не могут

<sup>4</sup>Полициклические ароматические углеводороды.

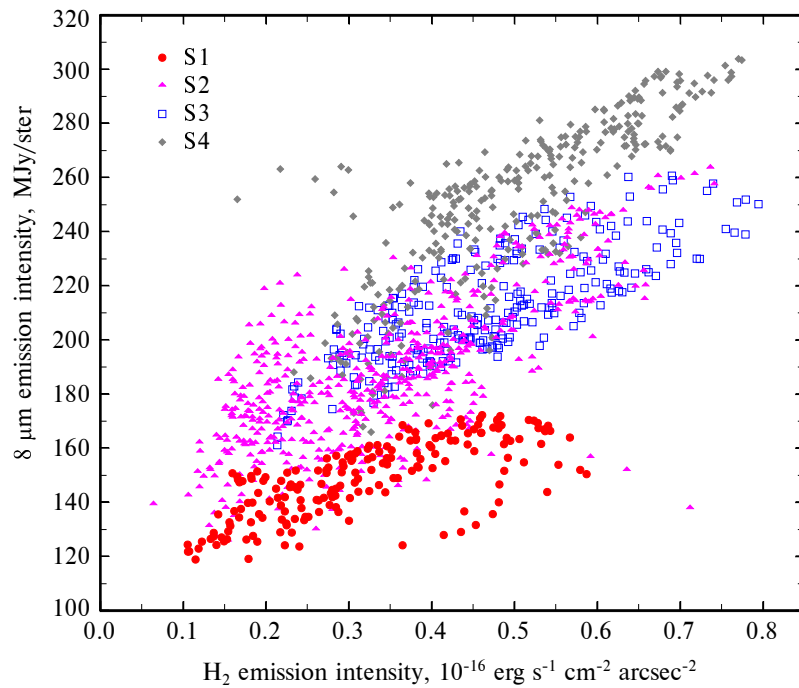


Рис. 5. Связь эмиссии молекулярного водорода с эмиссией на 8 мкм в избранных областях ИК-оболочки.

отвечать за структуру оболочки, и она также «чувствует» влияние звезд Суг ОВ1.

### 3.2. Инфракрасные пузыри

На рис. 3б показано распределение эмиссии  $H_2$  к востоку от ИК-оболочки, в области Пузырей Е и W. Здесь структура эмиссионной карты  $H_2$  намного сложнее. Она содержит многочисленные изогнутые волокна, выпуклые части которых ориентированы как в направлении ионизирующих звезд 10г–14г, так и в противоположную сторону (см. Статью III и рис. 2а).

На рис. 7 мы приводим диаграмму, иллюстрирующую взаимосвязь эмиссий  $H_2$  и 8 мкм для деталей, показанных на рис. 3б. Данные  $H_2$ , представленные на рис. 7 и рис. 8, были свернуты с разрешением данных Spitzer на 8 мкм. Между двумя индикаторами в детали В1 (красные кружки) есть положительная корреляция, но в самой яркой детали В3 ситуация сложнее, отношение четко разделяется на две ветви (синие квадраты). Дальнейший анализ показывает, что нисходящая ветвь с уменьшением эмиссии на 8 мкм по мере увеличения яркости эмиссии  $H_2$  соответствует внутренней части детали, а восходящая ветвь — внешней ее части. Такая структура указывает на некоторое смещение между пиком эмиссии  $H_2$  и пиком эмиссии на 8 мкм. Намек на подобное расщепление ветвей виден и в детали В2. Это также может свидетельствовать о смещении между эмиссионными пиками  $H_2$  и 8 мкм или указывать на еще более сложную морфологию.

На рис. 8 представлены профили различных индикаторов эмиссий вдоль срезов, показанных на рис. 3б. Небольшие размеры пузырей и связанные с ними эмиссионные детали  $H_2$ , а также недостаточное разрешение имеющихся данных наблюдений  $H\alpha$  позволяют лишь оценить верхние пределы расстояний между фронтами ионизации и диссоциации (поскольку мы не можем надежно определить положение фронта ионизации) и ширины эмиссионных оболочек  $H_2$  порядка нескольких угловых секунд. В нашем моделировании это примерно соответствует звезде класса В1 V, находящейся на расстоянии около 0.1–0.3 пк от оболочки плотностью  $10^3$ – $10^4$   $cm^{-3}$ , что согласуется с небольшими размерами пятен и нашей гипотезой о том, что они представляют области H II вокруг звезд 1г и 5г скопления vdB 130.

На рис. 8с мы видим смещение между максимумами эмиссий на 8 мкм и  $H_2$  в упомянутой выше детали cb3. Намек на подобное смещение виден и в детали cb2 (рис. 8b). Напрашивается предположение, что разные пространственные расположения эмиссионной оболочки 8 мкм и эмиссионной оболочки  $H_2$  указывают на то, что молекулы  $H_2$ , в отличие от молекул ПАУ, возбуждаются в этих деталях в основном столкновением, так что мы на самом деле видим разделение фронта ионизации и фронта ударной волны.

**Таблица 2.** Объекты молекулярного водорода, отождествленные в Makin and Froebrich (2018) с деталями истечений и также наблюдаемые в этой работе. В скобках указан номер панели на рис. 11 из работы Makin and Froebrich (2018) с соответствующей картой

| МНО ID        | OF ID   | $\alpha$ (J 2000) | $\delta$ (J 2000) | Размер, угл. сек. |
|---------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| МНО 973 (357) | OF374C  | 20:17:01.6        | +39:22:21         | 4                 |
| МНО 974 (356) | OF373A  | 20:17:03.6        | +39:22:01         | 7                 |
|               | OF373B  | 20:17:00.9        | +39:21:19         | 4                 |
|               | OF373C  | 20:16:59.0        | +39:20:55         | 5                 |
|               | OF373DE | 20:16:56.2        | +39:20:15         | 5                 |
| МНО 976 (358) | OF375A  | 20:17:04.7        | +39:21:21         | 2                 |
|               | OF375B  | 20:17:03.4        | +39:21:15         | 2                 |
|               | OF375C  | 20:16:56.6        | +39:20:34         | 4                 |
|               | OF375D  | 20:16:54.7        | +39:20:26         | 2                 |
|               | OF375E  | 20:16:52.7        | +39:20:03         | 3                 |
| МНО 977 (359) | OF376A  | 20:17:03.2        | +39:20:53         | 4                 |
|               | OF376B  | 20:17:03.7        | +39:20:01         | 4                 |
| МНО 981 (345) | OF361A  | 20:17:40.5        | +39:20:32         | 10                |
|               | OF361B  | 20:17:40.4        | +39:20:47         | 5                 |
|               | OF361C  | 20:17:40.4        | +39:20:59         | 5                 |
| МНО 982 (344) | OF360A  | 20:17:46.7        | +39:20:46         | 3                 |
|               | OF360B  | 20:17:44.9        | +39:20:33         | 3                 |

### 3.3. Объекты с молекулярным водородом

Область к западу от ИК-оболочки (где расположено протоскопление) не содержит каких-либо широких эмиссионных деталей  $H_2$ , но на нашем изображении  $H_2$  в фильтре в ней присутствует несколько компактных мало контрастных объектов. Поскольку в этой области нет звезд ранних типов (Статья III), излучение в линии  $H_2$  требует возбуждения столкновениями, указывая на наличие ударных волн. Таким образом, эти компактные объекты соответствуют молекулярным истечениям, сформированным протозвездами, включая массивные (см., например, Wolf-Chase et al., 2013). (Возможность массивного звездообразования в этой области подтверждается наличием детали, напоминающей темное инфракрасное облако, видимое на крупномасштабной карте 8 мкм.) И действительно, компактные источники излучения  $H_2$  в области протоскопления были отмечены как детали истечения в статье Makin and Froebrich (2018).

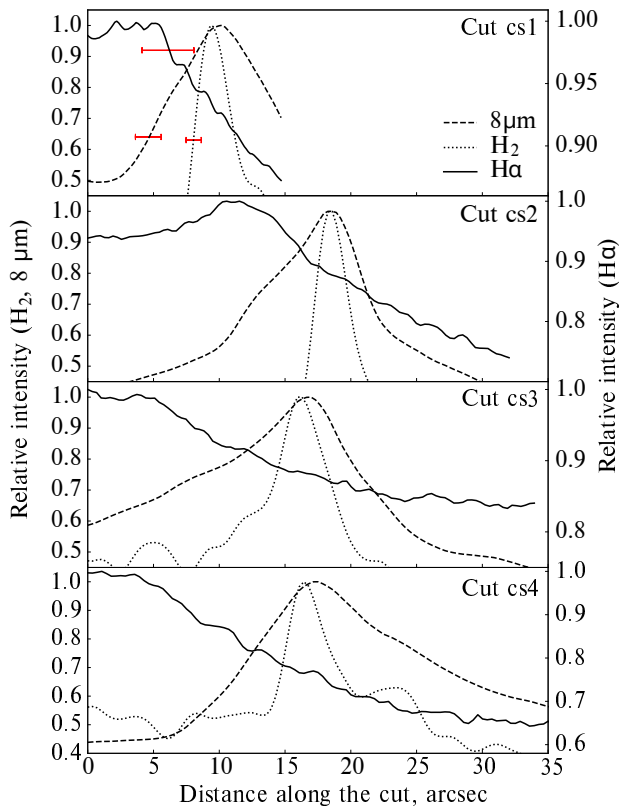
Комплекс Лебедь X был полностью картирован в линии молекулярного водорода 2.12 мкм в проекте UWISH2 (Froeblich et al., 2015). Makin and Froebrich (2018) использовали данные из этого обзора для отождествления четырех потенциальных истечений, в их обозначении это OF373, OF374,

OF375, OF376. Эти истечения также ассоциируются с объектами с линиями излучения молекулярного водорода (Molecular Hydrogen Emission-Line Objects (МНО)): МНО 974, МНО 973, МНО 976, МНО 977 из каталога МНО (Davis et al., 2010)<sup>5</sup>. Отдельные детали этих истечений, показанные на рис. 9а, совпадают с компактными источниками на нашей карте. Координаты и приблизительные размеры объектов с молекулярным водородом, идентифицированные Makin and Froebrich (2018) с деталями истечений и также наблюдавшиеся в этой работе, приведены в таблице 2.

Наиболее яркая деталь OF373C, а также другая деталь OF376A совпадают с рассеянным излучением в ближнем ИК-диапазоне Spitzer, включая 4.5 мкм (рис. 9b), которое предположительно содержит излучение ударноволнового молекулярного водорода (Beuther et al., 2005; Rathborne et al., 2005). Рассеянные эмиссионные объекты 4.5 мкм известны как протяженные зеленые объекты (Extended Green Objects (EGO)) и считаются указателями активности истечения. Их связь с эмиссионными деталями  $H_2$  показана на рис. 9b, представляющем собой трехцветное изображение области протоскопления с использованием приня-

<sup>5</sup><http://astro.kent.ac.uk/df/MHCat/index.html>





**Рис. 6.** Профили интенсивностей  $H\alpha$ , 8 мкм и  $H_2$  вдоль четырех срезов оболочки, отмеченных на рис. 3а (относительные единицы). Красные горизонтальные полосы на верхней панели указывают на соответствующие угловые разрешения, принятые как  $1''$  для данных  $H_2$ ,  $2''$  для данных 8 мкм и  $4''$  для данных  $H\alpha$  (Статья 1).

того цветового кодирования, основанного на данных 3.6 мкм (красный), 4.5 мкм (зеленый) и 8 мкм (синий) полос Spitzer. Видно, что из всех предполагаемых деталей истечений и связанных с ними МНО только две, OF373C и OF376A, явно связаны с EGO.

Это можно продемонстрировать другим способом, рассмотрев попиксельно связь между эмиссией молекулярного водорода и эмиссией на 4.5 мкм в избранных МНО, указанных на рис. 10. Детали OF373A и OF373DE (а также OF376B и OF374C, которые не помечены во избежание нагромождения) показывают излучение на 4.5 мкм на уровне фона, будучи довольно яркими в линии молекулярного водорода на 2.12 мкм. Излучение на 4.5 мкм в детали OF373B (треугольники зеленого цвета) незначительно выходит за пределы уровня фона, но также не показывает какую-либо взаимосвязь с излучением на 2.12 мкм. У детали OF373C (квадраты синего цвета) и OF376A (красные кружки), напротив, интенсивности на 4.5 мкм и 2.12 мкм вроде бы коррелируют, но со значительным разбросом и сложной формой распределения точек

на графике. Эта сложная форма может указывать на присутствие некоторых неоднородностей распределения интенсивностей на 4.5 мкм и 2.12 мкм, таких как смещения, упомянутые ранее в связи с инфракрасными пятнами. В любом случае мы полагаем, что детали OF373C и OF376A содержат возможные истечения от массивных протозвездных сгустков.

Интересно, что Makin and Froebrich (2018) обозначили OF373A–OF373DE как детали одного и того же истечения, но на рис. 10 они следуют разным трендам, и то же самое верно и для OF376A и OF376B. Заметим также, что если объекты OF373A–OF373DE действительно являются частью одного и того же джета, находящегося на расстоянии vdB 130, то вся длина этого джета значительно превысит 1 пк и он окажется в числе самых длинных у молодых звездных объектов (Young Stellar Objects (YSOs)) в  $H_2$  (Hirano et al., 2006; Makin and Froebrich, 2018).

В то время как в окрестностях ИК-пузырей, обсуждаемых в предыдущем подразделе, нас в основном интересовали протяженные области излучения  $H_2$ , мы также отметили наличие компактных источников излучения  $H_2$  между оболочкой и пузырями, показанными на рис. 3. Эти источники связаны с двумя истечениями, данными в каталоге Makin and Froebrich (2018) как OF360 и OF361.

#### 4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ В ОКРЕСТНОСТЯХ СКОПЛЕНИЯ vdB 130

Скопление vdB 130 и его окрестности содержат множество объектов на различных стадиях дозвездной и звездной эволюции (Rastorguev et al., 2023). В излучении  $^{13}CO$  преобладающее влияние во всей области имеет молекулярное облако длиной около 12 пк, большей частью расположенное вне сверхоболочки Cyg OB1, но выступающее в ионизированную полость в виде молекулярной колонны, имеющей кометарную форму и обращенной на восток (Cloud A, Schneider et al. (2007)). Очертания этого облака показаны на рис. 11а как контурами эмиссии CO, так и в виде полутоновой карты излучения на 160 мкм, основанной на данных, полученных с помощью прибора PACS (Poglitsch et al., 2010) на борту космической обсерватории Herschel (Pilbratt et al., 2010). Колонна направлена в сторону ближайших звезд Cyg OB1, но, скорее всего, это простое совпадение, поскольку колонна, по-видимому, является восточным окончанием длинного молекулярного волокна, проявляющегося на картах Herschel как эмиссионная деталь, а на картах Spitzer IRAC и MIPS — как абсорбционная деталь (темное облако в инфракрасном диапазоне, рис. 11b). Все волокно простирается далеко за

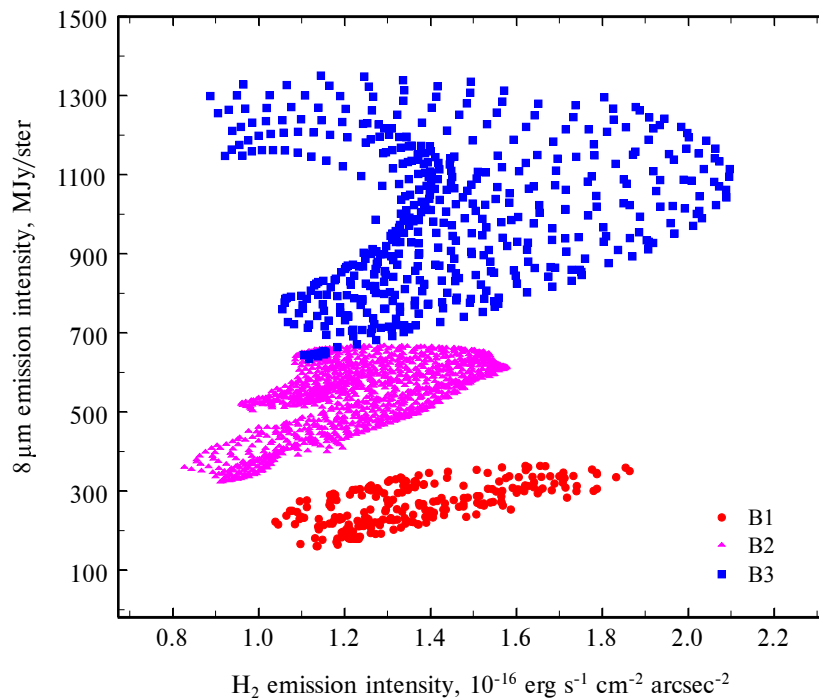


Рис. 7. Связь между эмиссией молекулярного водорода и эмиссией на 8 мкм в избранных областях пузырей.

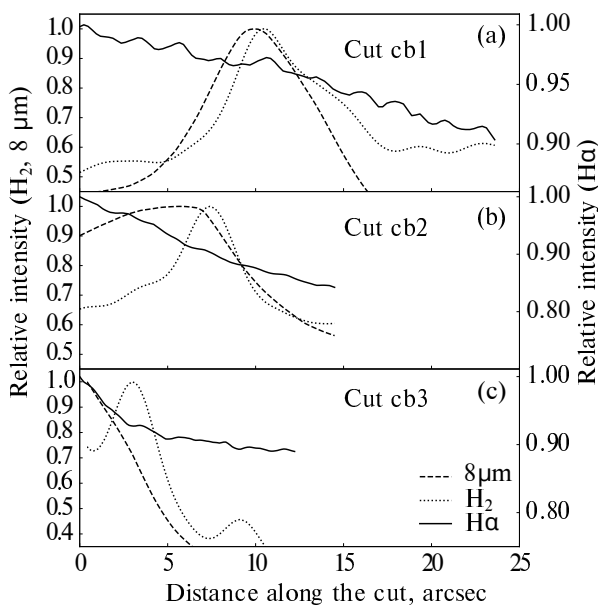


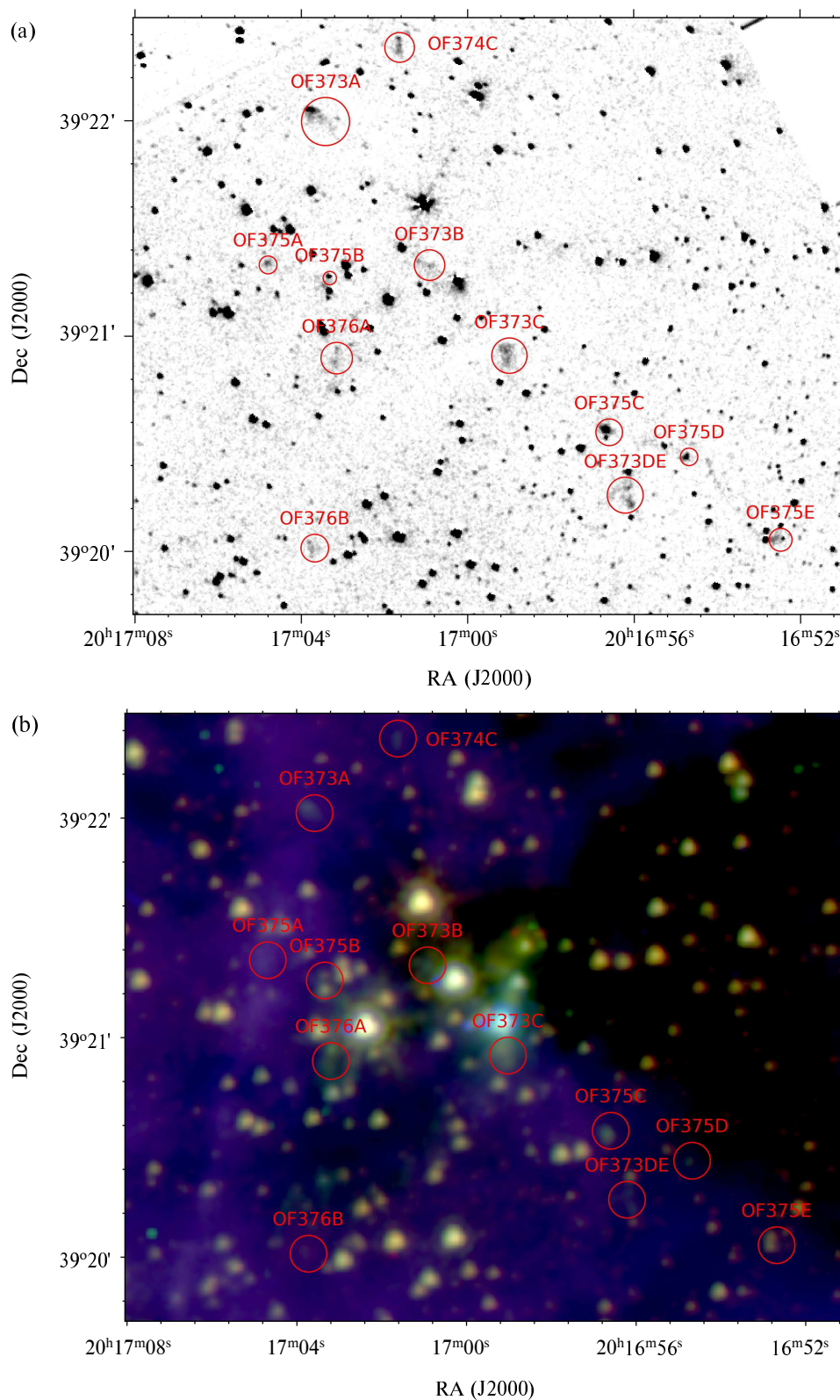
Рис. 8. Профили интенсивностей  $H\alpha$ , 8 мкм и  $H_2$  вдоль трех срезов через пузыри, указанные на рис. 3b (относительные единицы).

пределы сверхоболочки и, таким образом, не могло быть сформировано ионизирующим излучением звезд Суг ОВ1. Следует отметить, что по крайней мере часть неионизирующего УФ-излучения просачивается в невозмущенную область, о чем свидетельствует диффузное 8 мкм-излучение, видимое вне оболочки (рис. 1). Хотя это излучение может в

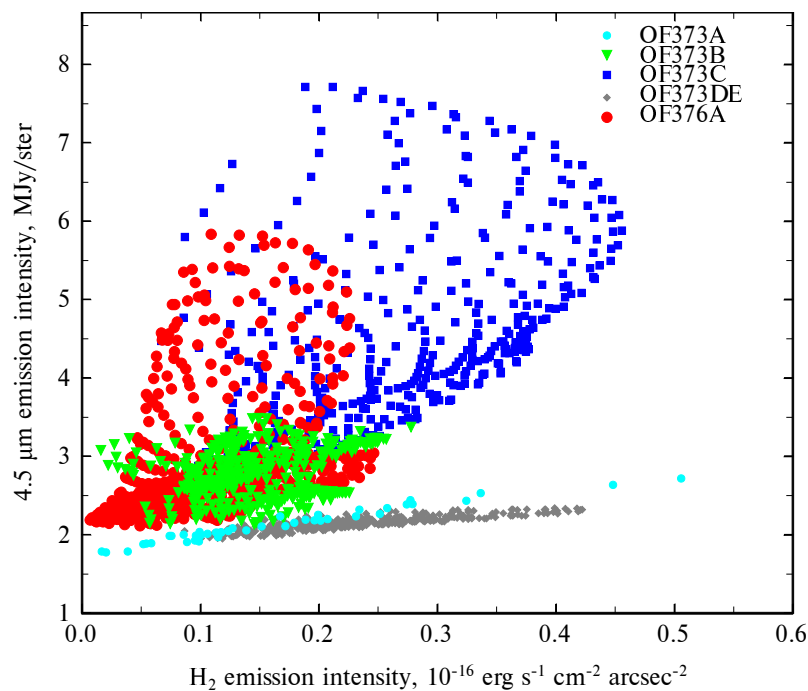
определенной степени изменить тепловое состояние волокна, вызывая его сжатие, оно вряд ли отвечает за его образование и форму, поскольку в настоящее время считается, что такие волокна являются общим элементом эволюции молекулярного облака и процесса звездообразования (Pineda et al., 2022).

Звездообразование могло быть ускорено и инициировано в восточной части волокна его взаимодействием с расширяющейся сверхоболочкой. В частности, ударная волна, связанная с расширяющейся оболочкой, могла сжать ранее существовавший сгусток внутри молекулярного волокна, ускорив его разрушение и рождение скопления vdV 130. Самые горячие звезды скопления «вырезали» собственную полость, которая, вероятно, находится на волокне со стороны наблюдателя, поскольку мы видим оболочку, окружающую vdV 130, некое излучение, в том числе диффузное излучение  $H_2$ , связанное с задней стенкой, но нет деталей поглощения перед ядром скопления vdV 130, которые указали бы на присутствие некоторой материи переднего плана. Само волокно и связанное с ним молекулярное облако были, скорее всего, частично разрушены в процессе формирования инфракрасной оболочки.

Восточная стенка оболочки, выметенной звездами скопления vdV 130, могла, в свою очередь, сдавить другие плотные сгустки внутри восточной части волокна, давая начало Пузырям E и W, которые в настоящее время все еще встроены в эту боковую стенку, частично проявляющуюся как



**Рис. 9.** Панель (а) — область ядра протоскопления в линии молекулярного водорода 2.12 микрон после вычитания континуума. Показаны детали истечений, отжествленные в статье Makin and Froebrich (2018). Панель (b) — композитное изображение той же области по данным Spitzer: 3.6 мкм (красный), 4.5 мкм (зеленый) и 8 мкм (синий).



**Рис. 10.** Отношение между излучением молекулярного водорода и излучением на 4.5 мкм на выбранных участках протозвездной области.

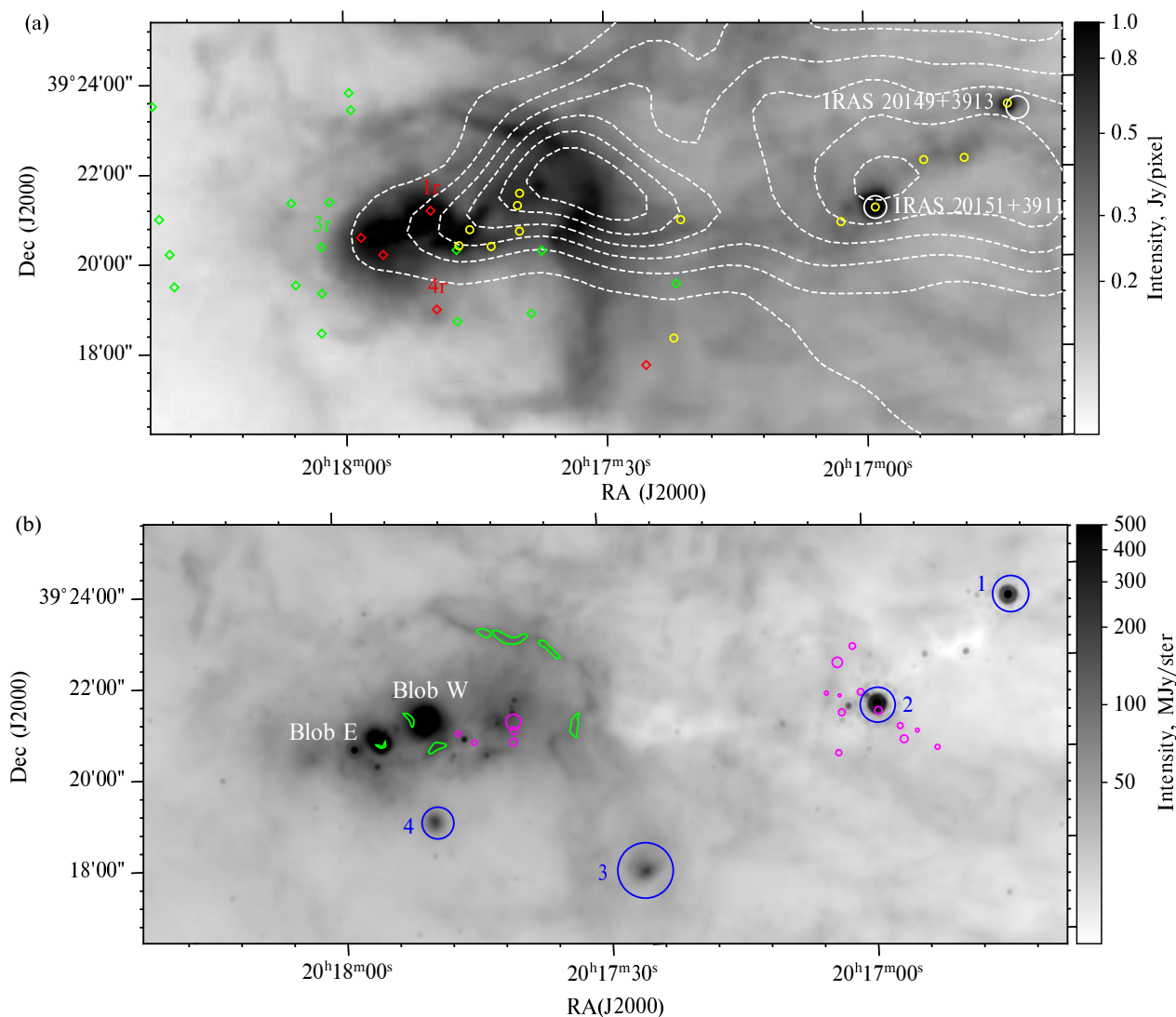
деталь поглощения, охватывающая Пузырь Е и простирающаяся к югу от него (см. рис. 9b в Статье I). Наши наблюдения  $H_2$  указывают, что инфракрасные пузыри — это ультракомпактные или, вероятно, гиперкомпактные области Н II, так как они, очевидно, моложе полуоткрытого пузыря вокруг скопления vdB 130.

Вдоль волокна в его невозмущенной части, к западу от ИК-оболочки, видны и другие плотные сгустки, выделяющиеся как пятна сильного ИК-излучения (24–160 мкм). Эти сгустки содержат источники IRAS 20149+3913 и IRAS 20151+3911, отождествленные как ультракомпактные области Н II в Gronfman et al. (1996). Области Н II видны в линии CS (2–1) на лучевых скоростях  $V_{LSR}$ , равных 3.1 и 4.2  $km\ s^{-1}$ , типичных для кометного облака (Schneider et al. 2007, Статьи I и II). На рис. 11a мы также показываем протозвезды, отождествленные Крюкова et al. (2014) (желтые кружочки). Две из этих протозвезд, очевидно, связаны с источниками IRAS; протозвезда, ассоциированная с IRAS 20151+3911, вероятно, питает истечение OF373. Некоторые другие источники, генерирующие истечения и отмеченные розовым цветом на рис. 11a, также совпадают с протозвездами из работы Крюкова et al. (2014).

Красные и зеленые ромбы на рис. 11a показывают соответственно молодые звездные объекты (YSO) класса I и с плоским спектром, а также YSO классов II/III, вероятно связанные с vdB 130,

как описано в статье Rastorguev et al. (2023). Они большей частью сконцентрированы в пределах ИК-оболочки, и только некоторые из них расположены вне ее. Наши оценки показывают, что YSO области протоскопления гравитационно не связаны с vdB 130. Возможно, они представляют собой рассеянное население этой области звездообразования.

На рис. 11b мы показываем ту же область, которая картирована в 24 мкм полосе Spitzer. На этой панели мы отметили области излучения  $H_2$ , исследуемые в данной работе вместе с четырьмя плотными сгустками, связанными с сильным излучением на 24 мкм. Поскольку это излучение, скорее всего, генерируется стохастически нагретыми маленькими частицами, поглощающими УФ-фотоны, оно также указывает на присутствие молодых массивных звезд. Две эти области, Сгусток 1 и Сгусток 2, расположенные в хвосте молекулярного облака, совпадают с областями яркого излучения Н 160 мкм (рис. 11a) и также видны как уплотнения на карте лучевых концентраций (см. рис. 13 в Статье II). Сгусток 2, совпадающий с IRAS 20151+3911, расположен в направлении компактного ядра протоскопления и пика эмиссии CO. Он также связан с возможными протяженными зелеными объектами (EGO), OF373 и OF376 (отмечены зелеными контурами на рис. 11b). Часть волокна, соединяющего ИК-оболочку, IRAS 20149+3913 и IRAS 20151+3911,



**Рис. 11.** Разнообразие звездообразующих объектов в окрестностях vdB 130. Панель (а): на заднем плане показана карта излучения на 160 мкм. YSO, отождествленные в статье Rastorguev et al. (2023) как члены скопления vdB 130, отмечены красными (класса I и с плоским спектром) и зелеными (классов II/III) ромбами. Желтые кружки — это YSO, найденные Kruikova et al. (2014). Белыми кружками выделены ультракомпактные области H II. Панель (б): та же область в полосе Spitzer на 24 мкм. Зеленый контур очерчивает области яркого излучения H<sub>2</sub>, исследуемые в данной работе. Синие кружки обозначают плотные сгустки, связанные с сильным излучением на 24 мкм. Детали истечений (Makin and Froebrich, 2018) показаны розовыми кружками.

можно видеть как инфракрасное темное облако на картах излучения и на 8 мкм, и на 24 мкм. Нет никакого явного протозвездного уплотнения в направлении Сгустка 1. К югу от vdB 130 есть две другие ИК-туманности — Сгусток 3 и Сгусток 4. Расположение Сгустка 4 (также отмеченного на рис. 2а) совпадает со звездой скопления 4г; таким образом, он может представлять собой еще одно небольшое место звездообразования внутри большего по размеру комплекса. Не ясно отношение Сгустка 3 к изучаемой области без данных о расстоянии.

Два истечения со связанными с ними МНО вме-

сте с несколькими YSO расположены в плотных частях волокна внутри ИК-оболочки (в проекции), но в целом звездообразование, по-видимому, находится на более продвинутой стадии в окрестностях скопления vdB 130, что также проявляется в различных свойствах излучения H<sub>2</sub>. На близком расстоянии от vdB 130 видно несколько протяженных диффузных деталей эмиссии H<sub>2</sub>, которые соотносятся с деталями эмиссии РАН и, несомненно, связаны с областями H II, обозначенными как Пузырь E, Пузырь W и Hα Пузырь в наших предыдущих работах. Оболочка вокруг скопления vdB 130 (Пузырь Hα) кажется вполне сформировавшейся и

обнаруживает признаки влияния крупномасштабного излучения от  $\text{Cyg OB1}$  в линии излучения  $\text{H}_2$ . Пузыри E и W кажутся моложе (несмотря на то, что они ближе к  $\text{Cyg OB1}$ ), и их излучение  $\text{H}_2$  выглядит как излучение более компактной области Н II. К западу от ИК-оболочки излучение  $\text{H}_2$  наблюдается только в нескольких компактных пятнах, отдельные из которых, возможно, связаны с джетам. Никаких признаков областей Н II, похожих на Пузыри E и W, там не видно.

В Статье II мы предложили эволюционный сценарий, который связывает активность звездообразования в окрестностях скопления  $\text{vdB 130}$  с расширением сверхоболочки  $\text{Cyg OB1}$  и ее взаимодействием с кометарным облаком CO, представляющим собой передний конец длинной молекулярной филаментарной структуры. Согласно этому сценарию, само скопление является наиболее проэволюционировавшей областью звездообразования, лежащей в центре инфракрасной оболочки меньшего размера, охватывающей скопление с запада. К востоку от скопления расширение областей Н II вокруг скопления могло «подстегнуть» звездообразование и последующее формирование области Н II в Пузырях W и E (и, возможно, в Сгустке 4 вокруг звезды 4г). Инфракрасная оболочка, по-видимому, еще не вызвала какой-либо заметной активности звездообразования (за исключением, может быть, Сгустка 3).

Общая структура эмиссии  $\text{H}_2$  в целом соответствует этому сценарию, но следует сделать несколько оговорок. Прежде всего, если возраст скопления  $\text{vdB 130}$  действительно составляет 10 млн лет, его формирование не могло быть вызвано расширением сверхоболочки  $\text{Cyg OB1}$ . Расстояние от скопления до сверхоболочки в проекции не превышает нескольких парсек. Это намного меньше, чем расстояние, которое сверхоболочка преодолела за 10 млн лет. В этом случае сверхоболочка могла просто «вымести» из окрестности головы облака менее плотный молекулярный газ и выявить ранее существовавшее звездообразующее скопление. Однако, как мы утверждали выше, 10 млн лет можно рассматривать только как верхнюю границу возраста скопления. Наличие многочисленных YSO, в том числе классов I и II, которые являются вероятными членами скопления (Rastorguev et al., 2023), свидетельствует о том, что фактический возраст  $\text{vdB 130}$  может быть намного меньше, будучи сопоставимым со временем с момента прохождения сверхоболочки.

Звездообразование в спокойной (невозмущенной) части волокна, в том числе и формирование протоскопления, вероятно, вызвано какими-то другими событиями, напрямую не связанными с

расширением сверхоболочки. Одна из возможностей заключается в том, что формирование протоскопления было каким-то образом спровоцировано или ускорено неионизирующим УФ-излучением O-звезд ассоциации, например сжатием ранее существовавших плотных сгустков (Shematovich et al., 1999). Это излучение действительно может проникать через сверхоболочку, что подчеркивается наличием диффузного излучения в ближнем ИК-диапазоне Spitzer за пределами сверхоболочки (см. рис. 1). Такой вариант можно дополнительно изучить с помощью наблюдений молекулярных линий (например, Sun et al., 2008).

Наконец, возможно, что эта область претерпела несколько эпизодов начала звездообразования, обусловленных взаимодействием аккреционных потоков, ионизованных областей и (несколько позже) вспышек сверхновых от звезд в  $\text{Cyg OB1}$ . На более ранних стадиях эволюции звездообразующего комплекса это действительно может создавать «осциллирующие» области Н II, которые то увеличиваются, то уменьшаются (Peters et al., 2010), что ведет к повторяющимся приближению и отступлению ионизирующего излучения. В таком случае формирование  $\text{vdB 130}$  и формирование протоскопления могли быть вызваны двумя независимыми триггерными событиями. Однако на более поздних стадиях эволюции после образования сверхоболочек такого сложного поведения вряд ли можно ожидать.

В целом, все перечисленные свидетельства не противоречат сценарию последовательного звездообразования в области  $\text{vdB 130}$ . Однако надо признать, что они не являются уверенным доказательством. Для более обоснованных выводов необходимы гораздо более детальные данные об этой области.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты новых наблюдений окрестностей скопления  $\text{vdB 130}$ , выполненных в фильтре с центром на линии  $\text{H}_2$  на 2.12 мкм, установленном на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Показано, что в окрестностях скопления  $\text{vdB 130}$  вращательно-колебательное излучение молекулярного водорода мало контрастно, но пространственно четко совпадает с излучением на 8 мкм, относящимся к частицам ПАУ, как в инфракрасной оболочке, так и в областях вокруг инфракрасных пузырей. Существует положительная корреляция между линией  $\text{H}_2$  и интенсивностью полосы 8 мкм почти везде, кроме внутренней части самой яркой эмиссионной детали  $\text{H}_2$ , окружающей Пузырь E. Это указывает на то, что эмиссия  $\text{H}_2$  в окрестностях скопления  $\text{vdB 130}$  в основном представляет собой флуоресцентное излучение,

возбуждаемое УФ-излучением звезд скопления в многочисленных PDR, обнаруживая сложное распределение газа в этой области. Компактные участки излучения  $H_2$  в области протоскопления, вероятно, возбуждаются столкновениями и соответствуют нескольким протозвездным истечениям.

Результаты наблюдений не противоречат сценарию последовательного звездообразования, стимулируемого расширяющейся сверхоболочкой вокруг ассоциации Cyg OB1, но, с другой стороны, недостаточно убедительны, чтобы утверждать это с уверенностью.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа частично основана на данных космического телескопа Spitzer, управляемого Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту NASA 1407 и данных из каталога 2MASS (Массачусетский университет, Калифорнийский технологический институт, НАСА и Национальный научный фонд). Изображения Spitzer GLIMPSE360 предоставлены Лабораторией реактивного движения (НАСА) Калифорнийского технологического института. Данные наблюдений CO были любезно предоставлены Н. Шнайдером. Каталог МНО размещен в Кентском университете. Herschel — это космическая обсерватория ЕКА с научными инструментами, предоставленными европейскими консорциумами главных исследователей и при существенном участии НАСА.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено на оборудовании, купленном на средства Программы развития Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, и поддержано грантами РФФИ (№ 18-02-00976, № 18-02-00890, № 19-02-00611). Д. Вибе, А. М. Татарников, А. А. Татарников поддержаны грантом РФФИ № 20-02-00643. Авторы благодарят за поддержку Программу развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (Ведущая научная школа «Физика звезд, релятивистских объектов и галактик»). Работа А. Топчиевой поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Aniano, B. T. Draine, K. D. Gordon, and K. Sandstrom, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **123** (908), 1218 (2011).
2. V. P. Arkhipova, O. V. Egorov, V. F. Esipov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432** (3), 2273 (2013).
3. H. Beuther, T. K. Sridharan, and M. Saito, *Astrophys. J.* **634** (2), L185 (2005).
4. C. Blaha and R. M. Humphreys, *Astron. J.* **98**, 1598 (1989).
5. L. Bronfman, L. A. Nyman, and J. May, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **115**, 81 (1996).
6. C. J. Davis, R. Gell, T. Khanzadyan, et al., *Astron. and Astrophys.* **511**, id. A24 (2010).
7. L. Deharveng, A. Zavagno, and J. Caplan, *Astron. and Astrophys.* **433** (2), 565 (2005).
8. G. G. Fazio, J. L. Hora, L. E. Allen, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154** (1), 10 (2004).
9. G. J. Ferland, M. Chatzikos, F. Guzmán, et al., *Revista Mexicana Astronom. Astrofís.* **53**, 385 (2017).
10. D. Froebrich, S. V. Makin, C. J. Davis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **454** (3), 2586 (2015).
11. E. Habart, R. Le Gal, C. Alvarez, et al., *arXiv e-prints astro-ph/2206.08245* (2022).
12. N. Hirano, S.-Y. Liu, H. Shang, et al., *Astrophys. J.* **636** (2), L141 (2006).
13. R. M. Humphreys and D. B. McElroy, *Astrophys. J.* **284**, 565 (1984).
14. E. Kryukova, S. T. Megeath, J. L. Hora, et al., *Astron. J.* **148** (1), 11 (2014).
15. M. A. Kuhn, R. S. de Souza, A. Krone-Martins, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **254** (2), 33 (2021).
16. T. Lanz and I. Hubeny, *Astrophys. J. Suppl.* **169** (1), 83 (2007).
17. T. A. Lozinskaya, V. V. Pravdikova, T. G. Sitnik, et al., *Astronomy Reports* **42** (4), 453 (1998).
18. S. V. Makin and D. Froebrich, *Astrophys. J. Suppl.* **234** (1), article id. 8 (2018).
19. A. E. Nadjip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 349 (2017).
20. T. Peters, M.-M. Mac Low, R. Banerjee, et al., *Astrophys. J.* **719** (1), 831 (2010).
21. G. L. Pilbratt, J. R. Riedinger, T. Passvogel, et al., *Astron. and Astrophys.* **518**, id. L1 (2010).
22. J. E. Pineda, D. Arzoumanian, P. André, et al., *arXiv e-prints astro-ph/2205.03935* (2022).
23. A. Poglitsch, C. Waelkens, N. Geis, et al., *Astron. and Astrophys.* **518**, id. L2 (2010).
24. R. Racine, *Astron. J.* **79**, 945 (1974).
25. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, T. G. Sitnik, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (2), 119 (2023).
26. J. M. Rathborne, J. M. Jackson, E. T. Chambers, et al., *Astrophys. J.* **630** (2), L181 (2005).
27. N. Schneider, S. Bontemps, R. Simon, et al., *Astron. and Astrophys.* **529**, id. A1 (2011).
28. N. Schneider, R. Simon, S. Bontemps, et al., *Astron. and Astrophys.* **474** (3), 873 (2007).

29. N. Schneider, J. Stutzki, G. Winnewisser, and D. Block, *Astron. and Astrophys.* **335**, 1049 (1998).
30. V. I. Shematovich, D. S. Wiebe, and B. M. Shustov, *Astronomy Reports* **43** (10), 645 (1999).
31. T. G. Sitnik, O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **454** (3), 2486 (2015).
32. T. G. Sitnik, O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (2), 2449 (2019).
33. T. G. Sitnik, A. S. Rastorguev, A. A. Tatarnikova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **498** (4), 5437 (2020).
34. K. Sun, V. Ossenkopf, C. Kramer, et al., *Astron. and Astrophys.* **489** (1), 207 (2008).
35. A. M. Tatarnikov, S. G. Zheltoukhov, N. Shatsky, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 384 (2023).
36. A. A. Tatarnikova, A. M. Tatarnikov, T. G. Sitnik, and O. V. Egorov, *Astronomy Letters* **42** (12), 790 (2016).
37. G. Wolf-Chase, K. Arvidsson, M. Smutko, and R. Sherman, *Astrophys. J.* **762** (2), article id. 87 (2013).

## Analysis of the Interstellar Matter at the Periphery of the Supershell Surrounding the Cyg OB1 Association in the 2.12 Micron Molecular Hydrogen Line

D. S. Wiebe<sup>1,\*</sup>, T. G. Sitnik<sup>2</sup>, A. S. Rastorguev<sup>2,3</sup>, T. A. Lozinskaya<sup>2</sup>, A. M. Tatarnikov<sup>2,3</sup>, A. A. Tatarnikova<sup>2</sup>, A. P. Topchieva<sup>1</sup>, M. V. Zabolotskikh<sup>2</sup>, A. A. Fedoteva<sup>2</sup>, and A. A. Tatarnikov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

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

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119191 Russia

We present observations of the vdB 130 cluster vicinity in a narrow-band filter centered at a 2.12  $\mu\text{m}$  molecular hydrogen line performed at the Caucasus Mountain Observatory of the Lomonosov Moscow State University. The observations reveal an H<sub>2</sub> emission shell around vdB 130, coincident with a bright infrared shell, visible in all Spitzer bands. Also, numerous H<sub>2</sub> emission features are detected around infrared Blobs E and W and in the vicinity of a protocluster located to the east of the shell, in a tail of a cometary molecular cloud. H<sub>2</sub> emission in the vicinity of the vdB 130 cluster is mostly generated in well-developed H II regions and is of fluorescent nature. In the protocluster area, isolated spots are observed, where H<sub>2</sub> emission is collisionally excited and is probably related to shocks in protostellar outflows. Obtained results are discussed in the context of possible sequential star formation in the vicinity of the vdB 130 cluster, triggered by the interaction of the expanding supershell surrounding the Cyg OB1 association with the molecular cloud and an associated molecular filament.

Keywords: *ISM: kinematics and dynamics* — *ISM: clouds* — *ISM: lines and bands*