

## ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЗВЕЗДЫ АЕ ХЕРБИГА VX CAS В БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ И ОПТИЧЕСКОМ УЧАСТКАХ СПЕКТРА

© 2022 г. Н. В. Ефимова<sup>1</sup>, А. А. Архаров<sup>1</sup>, В. П. Гринин<sup>1, 2, \*</sup>,  
А. Н. Ростопчина-Шаховская<sup>3</sup>, Д. Н. Шаховской<sup>3</sup>, В. М. Ларионов<sup>1, 2</sup>,  
С. А. Климанов<sup>1</sup>, Д. Л. Горшанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Астрономический институт им. В.В. Соболева, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

\*E-mail: vgcrao@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2020 г.

После доработки 25.11.2021 г.

Принята к публикации 26.11.2021 г.

Приведены результаты исследования долговременной фотометрической активности в ближней инфракрасной области спектра молодой звезды Ае Хербига VX Cas, принадлежащей семейству неправильных переменных типа UX Ori. Инфракрасные данные получены в 2003–2017 гг. в обсерватории Кампо Императоре (Италия) с помощью Пулковского телескопа АЗТ-24 в фотометрических полосах JHK Джонсона. Также была использована дополнительная оптическая фотометрия из разных источников. Показано, что наблюдаемая фотометрическая активность звезды в полосах J и частично в H вызвана, в основном, вариациями околозвездной экстинкции в протопланетном диске. В ряде эпизодов наблюдалась антикорреляция между изменениями блеска в оптической полосе V и полосах H и K: при ослаблениях блеска в полосе V блеск в полосах H и K увеличивался. Это свидетельствует о том, что газопылевые облака, экранировавшие звезду от наблюдателя, состояли из горячей пыли и находились вблизи зоны сублимации.

*Ключевые слова:* молодые звезды, переменная околозвездная экстинкция, звезда VX Cas, инфракрасная и оптическая фотометрия, внутренние области протопланетного диска

DOI: 10.31857/S0004629922030021

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Неправильные переменные звезды типа UX Ori относятся к числу фотометрически наиболее активных молодых звезд. Характерной особенностью их переменности являются алголеподобные ослабления блеска с амплитудой до 2–3<sup>m</sup> и продолжительностью от нескольких дней до нескольких недель. На эти минимумы иногда накладываются более длительные и медленные изменения блеска аperiодического или циклического характера. Такая переменность связана с изменениями околозвездной экстинкции в протопланетных дисках, имеющих клочковатую структуру и наклоненных под небольшим углом к лучу зрения [1]. Первоначально семейство звезд типа UX Ori состояло в основном из горячих молодых звезд типа Ае Хербига. В последние годы оно расширилось за счет более холодных молодых звезд типа Т Тельца. Часть из этих объектов

известна под названием “дипперы” (dippers). У них также наблюдаются алголеподобные затмения, но с намного меньшей амплитудой и продолжительностью.

В инфракрасной (ИК) области спектра излучение звезд типа UX Ori состоит из собственно излучения звезды и излучения газопылевого диска вокруг нее. Вклад излучения диска растет с увеличением длины волны, и оно в меньшей степени подвержено влиянию околозвездной экстинкции. В ближнем ИК диапазоне излучение происходит из самых внутренних слоев дисков, находящихся вблизи зоны испарения пыли [2]. Флуктуации светимости этих слоев обусловлены возмущениями в диске, в том числе возмущениями магнитного поля диска [3, 4].

Оптическое и ИК-излучение звезд типа UX Ori в полосах J и H обычно коррелируют между собой, потому что в ближнем ИК диапазоне звезда

вносит существенный вклад в измеряемый блеск, особенно в полосах  $J$  и  $H$ . Хотя есть примеры, когда такой корреляции не обнаружено, например, у SV Ser, звезды типа UX Ori [5]. В настоящей работе, являющейся дополнением к серии работ [3, 5, 6] по изучению ИК-активности звезд типа UX Ori и родственных им объектов, представлены результаты многолетних фотометрических наблюдений в полосах  $JHK$  звезды VX Cas.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Переменность VX Cas была обнаружена в 1918 г. Балановским [7]. Как по своим фундаментальным параметрам, так и по величине ИК-избытка излучения VX Cas подобна другим звездам типа UX Ori. По данным GAIA [8] она находится на расстоянии  $537_{-16}^{+18}$  пк. Хотя в окрестности звезды имеется достаточно плотное звездное поле, с ней не связана отражательная туманность [9], и она не имеет очевидных признаков принадлежности к областям звездообразования [10]. Вопрос о физической двойственности VX Cas до сих пор остается открытым [11, 12]. Уточненный спектральный класс звезды A0 Ver [13]. Ее возраст по разным оценкам находится в интервале от 3.4 [14] до 9 Myr [8]. Имеющиеся в литературе оценки темпа аккреции сильно отличаются: от  $1.29 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$  [15] до  $3.63 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$  [16], что не удивительно, учитывая нестабильный характер процесса аккреции вещества на молодые звезды. Оценки поглощения  $A_V$  в направлении на VX Cas производились на основе анализа цветового избытка излучения и дают значения, близкие к единице [17–19]. VX Cas имеет высокую проекционную скорость вращения:  $v \sin i = 139$  км/с [13]. Эмиссионная линия H $\alpha$  имеет двухкомпонентный профиль [20]. Обе эти особенности, как показано в [21], характерны также для большинства других звезд типа UX Ori и свидетельствуют о большом наклоне оси вращения звезды и диска относительно направления на наблюдателя.

VX Cas демонстрирует характерное для звезд типа UX Ori активное фотометрическое поведение в оптической области спектра. Большую часть времени звезда находится в ярком состоянии, основной диапазон ее переменности — порядка  $0.5^m$ , но есть и глубокие (с амплитудой  $1-2^m$  в полосе  $V$ ) минимумы (историческую кривую блеска можно посмотреть, например, в работе [22]). Временной анализ показал отсутствие стабильных периодов в 1983–2004 гг. [23] и в 1898–1997 гг. [22]. Более короткие выборки давали периоды: 4.46 г. [24, 25] и 250 дней с амплитудой  $\sim 0.1^m$  [26], которые, однако, не подтвердились по-

следующими наблюдениями. Наблюдалась также сезонные тренды [24–29].

Инфракрасные наблюдения [30], в том числе наблюдения с помощью телескопа IRAS [31], показали, что звезда имеет значительный избыток ИК-излучения. По типу спектрального распределения энергии в интервале длин волн 20–100 мкм VX Cas относится к группе II, в которую входят звезды Хербига, характеризующиеся меньшей величиной избытка излучения в этой области (по сравнению с избытком объектов группы I) (классификация [32]). Это различие связано с формой диска: если для группы I диск расширяется к периферии, то для группы II он более плоский и “самоэкранирующийся” [32, 33]. Отношение ИК-избытка VX Cas к болометрической светимости звезды составляет 46%, что является одним из самых больших избытков ИК излучения и свидетельствует о большом количестве пыли в окрестности звезды [34].

Диаграммы “цвет–величина” VX Cas во время минимумов имеют характерную для звезд типа UX Ori форму: по мере ослабления блеска звезда краснеет, что объясняется селективным поглощением излучения звезды в газопылевых облаках [34]. Начиная с некоторого уровня блеска (для  $(U-B)$  и  $(B-V)$ ), направление цветового трека меняется, и покраснение приостанавливается из-за увеличения вклада рассеянного околозвездной пылью излучения звезды, когда ее прямое излучение ослабляется во время затмения [35]. В статье [34] из оценки производной  $\delta(B-V)/\delta V$  по верхней (не искаженной рассеянным светом) части цветового трека  $(B-V)/V$  авторы получили для VX Cas закон покраснения околозвездной пылью:  $R = 5 \pm 0.1$ .

Наблюдения VX Cas в ближнем ИК-диапазоне малочисленны и выполнялись в течение коротких интервалов времени: 1974 г., 1 ночь [30], 1970–1976 гг., 14 ночей [36], 1993 г., 1 ночь [37], 1998 г., 8 ночей [18, 38], 2006–2007 гг., 4 ночи [39]. Как правило, во время этих наблюдений оптический и ИК области спектра потоки изменялись в небольших пределах. Колотилев и др. [36] (14 ночей в интервале 1970–1976 гг.) наблюдали ИК переменность звезды с амплитудой около  $0.7^m$  в полосе  $J$ . Такая же амплитуда переменности в полосе  $J$  отмечена и в работе Egoa и др. [38]. Амплитуда изменений блеска в ИК уменьшается в сторону длинных волн, цветовая переменность слабая и описывается законом “чем слабее, тем краснее”, как и для оптической области [18, 38]. Отмечается как наличие корреляции между изменениями оптической и ИК звездной величиной [18, 38], так и наличие антикорреляции [36].

**Таблица 1.** Характеристики телескопа АЗТ-24 и приемника излучения SWIRCAM

Объект	Характеристика
Телескоп	АЗТ-24
Оптическая схема	Ричи-Кретьен с оптическим корректором
Диаметр	1100 мм
ПЗС-фотометр	SWIRCAM
Кристалл ПЗС	HgCdTe PICNIC
Тип фотометра	EFOSC*
Размер кристалла	256 × 256 пикселей
Поле кадра	4.4' × 4.4'
Размер пиксела	1.04"

Примечание. \* EFOSC (ESO Faint Object Spectrograph and Camera).

**Таблица 2.** Звезды сравнения в поле VX Cas

№	2MASS	<i>J</i> , mag	<i>H</i> , mag	<i>K</i> , mag
1	00313858 + 6159239	11.413	10.534	10.231
2	00314123 + 6159389	10.018	9.385	9.214

Примечание. Звездные величины взяты из каталога 2MASS.

Исследование линейной поляризации VX Cas выполнялось двумя группами: в 1998–1999 гг. (9 наблюдений) [40] и в 1987–2001 гг. (15 наблюдательных сезонов) [34]. Обнаружена ее переменность как на интервалах порядка дней или недель, так и на более длительных. В ярком состоянии звезды она равна ~1% и увеличивается до ~4% в глубоких минимумах [34], что объясняется увеличением вклада рассеянного излучения диска в наблюдаемое излучение.

### 3. НАБЛЮДЕНИЯ И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА

Фотометрические наблюдения в ИК-диапазоне были получены в 2003–2017 гг. на 1-м телескопе Пулковской обсерватории АЗТ-24, установленном на наблюдательной базе Кампо Императоре (Италия) и оснащенной инфракрасной ПЗС-камерой SWIRCAM [41, 42]. Наблюдения проводились в широких фотометрических полосах *J* (1.25 мкм), *H* (1.65 мкм) и *K* (2.20 мкм). Параметры камеры и телескопа представлены в табл. 1. Все наблюдения проводились методом смещения вокруг центрального положения кадра (dithering). Предварительная обработка изображений включала в себя сложение смещенных

экспозиций с усреднением, вычитание фона, коррекцию за плоское поле и удаление плохих пикселей. Фотометрия проводилась с помощью программы, разработанной В.М. Ларионовым на основе пакета SExtractor (Source-Extractor) для обработки астрономических изображений. Измерение блеска VX Cas было выполнено методом дифференциальной апертурной фотометрии относительно двух звезд сравнения. Звезды сравнения для VX Cas и их звездные величины из каталога 2MASS даны в табл. 2; поле со звездами сравнения представлено на рис. 1. Ошибки фотометрии составляют в среднем 0.01–0.02<sup>m</sup>.

Поскольку ИК-наблюдений VX Cas мало и они не пересекаются с нашими по времени, общую кривую блеска мы не приводим. Исключение составляют данные из статьи [39] (4 наблюдения), которые пересекаются с нашими наблюдениями и согласуются с ними в пределах 0.05–0.1<sup>m</sup> (в зависимости от фильтра). В дальнейшем для анализа мы используем только наши наблюдения. Наблюдения VX Cas в оптической области (полоса *I* Джонсона) получены в рамках программы фотополяриметрического мониторинга звезд типа UX Ori с помощью пятиканального фотометра-поляриметра конструкции Пииролы,

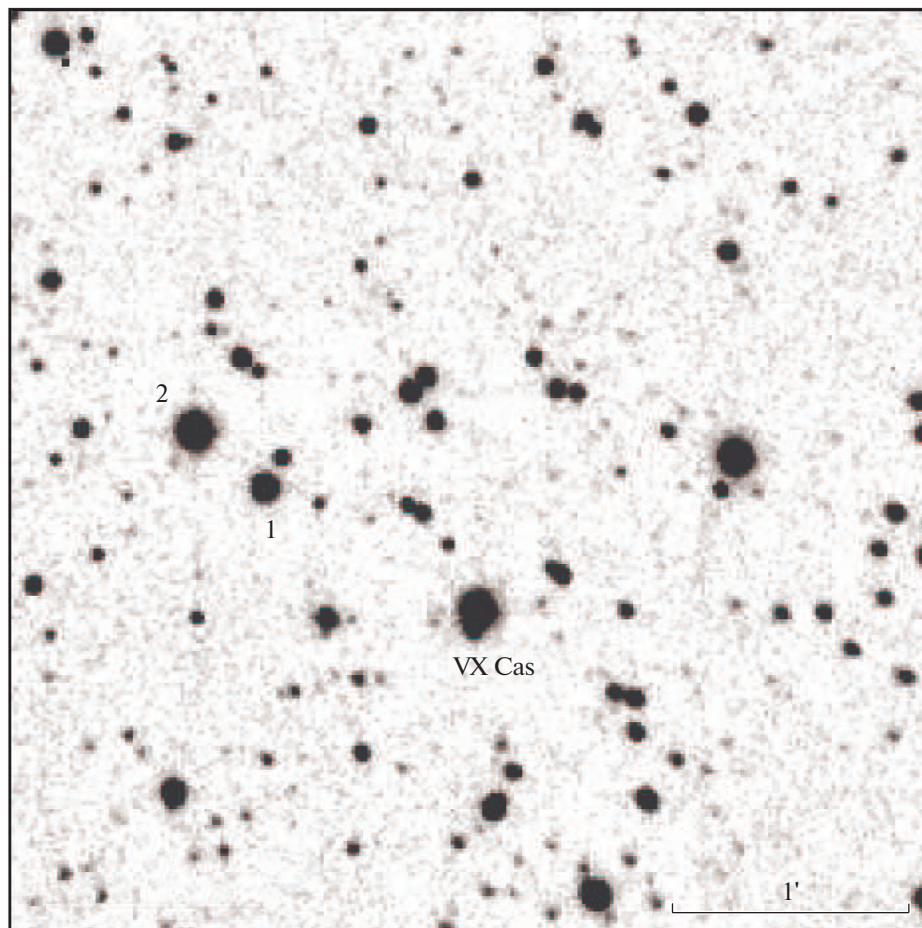


Рис. 1. Поле VX Cas со звездами сравнения.

установленного на 1.25 м телескопе АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории (КраО). Средняя ошибка фотометрических измерений составляет  $0.03^m$ . Для анализа поведения объекта в оптической области спектра были использованы также наблюдения в полосе  $V$  из базы данных AAVSO (The American Association of Variable Star Observers)<sup>1</sup> и каталога ASSAS<sup>2</sup>.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 4.1. Кривые блеска

На рис. 2 представлены кривые блеска VX Cas в оптическом (полоса  $V$ ) и ближнем ИК диапазонах. Наблюдения в полосе  $V$  включают в себя: данные обзора ASSAS, наблюдения двух участников проекта AAVSO James Roe (ROE) и James McMath (MJB), и наблюдения КраО. В ИК-диапазоне изменения блеска VX Cas имеют близкую

амплитуду во всех трех полосах ( $\Delta J = 0.65^m$ ,  $\Delta H = 0.59^m$ ,  $\Delta K = 0.69^m$ ), которая значительно меньше амплитуды в полосе  $V$  ( $\Delta V = 2.11^m$ ). Амплитуда переменности в  $K$  является наибольшей по сравнению с данными о других звездах типа UX Ori, опубликованными в работах [3, 6].

На рис. 2 виден циклический тренд в ИК-полосах с длительностью 5–6 лет, однако, поскольку в наблюдениях есть существенные лакуны, его параметры нельзя определить с хорошей точностью. Характерные времена изменения блеска в ИК полосах составляют от нескольких недель до нескольких месяцев.

Гистограммы активности VX Cas по данным ИК наблюдений представлены на рис. 3. Видно, что гистограмма в полосе  $J$  имеет вид, аналогичный гистограммам активности звезд типа UX Ori. Это говорит о том, что изменения околозвездной экстинкции являются главным источником переменности звезды в этой полосе. Судя по гистограммам активности звезды в полосах  $H$  и  $K$ ,

<sup>1</sup> <https://www.aavso.org/>

<sup>2</sup> <https://asas-sn.osu.edu/photometry>

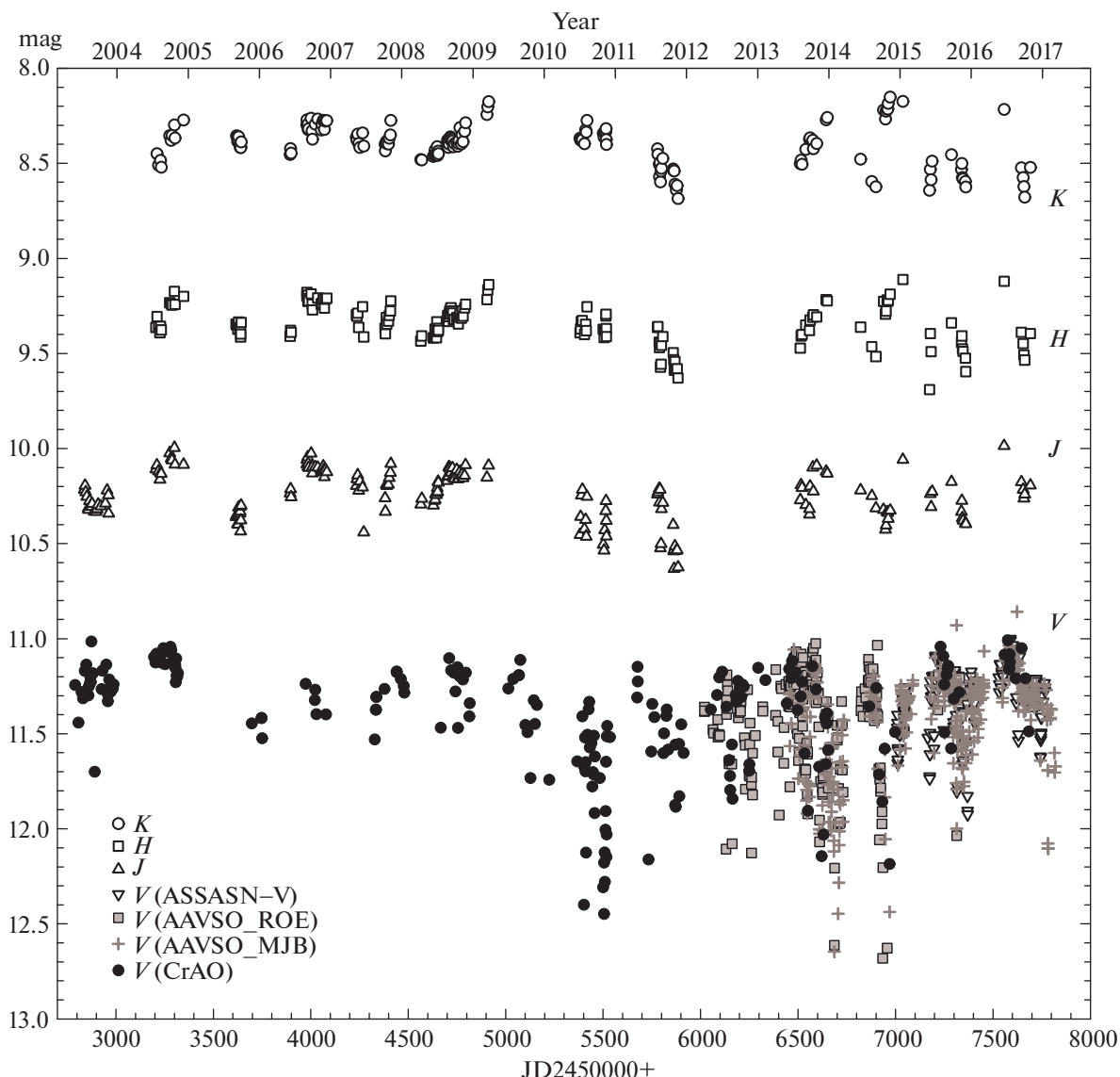


Рис. 2. Кривая блеска VX Cas в оптическом (полоса V) и ИК диапазонах (полосы JHK) в период 2003–2017 гг.

роль этого фактора в более длинноволновой части спектра менее существенна.

#### 4.2. Диаграммы цвет–величина

На рис. 4 представлены диаграммы “цвет–величина”  $J/(J-H)$  и  $J/(H-K)$ , построенные по всем наблюдениям, показанным на рис. 2. Звезда демонстрирует обычное для звезд типа UX Ori поведение: увеличение блеска объекта сопровождается увеличением цвета  $J-H$  и  $H-K$ .

#### 4.3. Корреляция между полосами

Для понимания связи между полосами мы построили зависимости звездных величин друг от

носительно друга (рис. 5). Блеск звезды в J и K показывает слабую зависимость (коэффициент корреляции Пирсона  $r \sim 0.16$ ), однако  $J(H)$  и  $H(K)$  демонстрируют значимую корреляцию:  $r \sim 0.52$  и  $0.82$  соответственно.

Отсутствие корреляции между полосами J и K говорит о том, что изменения блеска в полосе K связаны не только с изменением экстинкции на луче зрения, но и с изменением вклада излучения от диска. Сравнение инфракрасной и оптической переменности осложнено несовпадением дат большинства оптических и ИК наблюдений. Поскольку точных совпадений по датам мало (31 ночь), для анализа мы добавили близкие даты – в пределах 1–2 сут, без интерполяции. В итоге по-

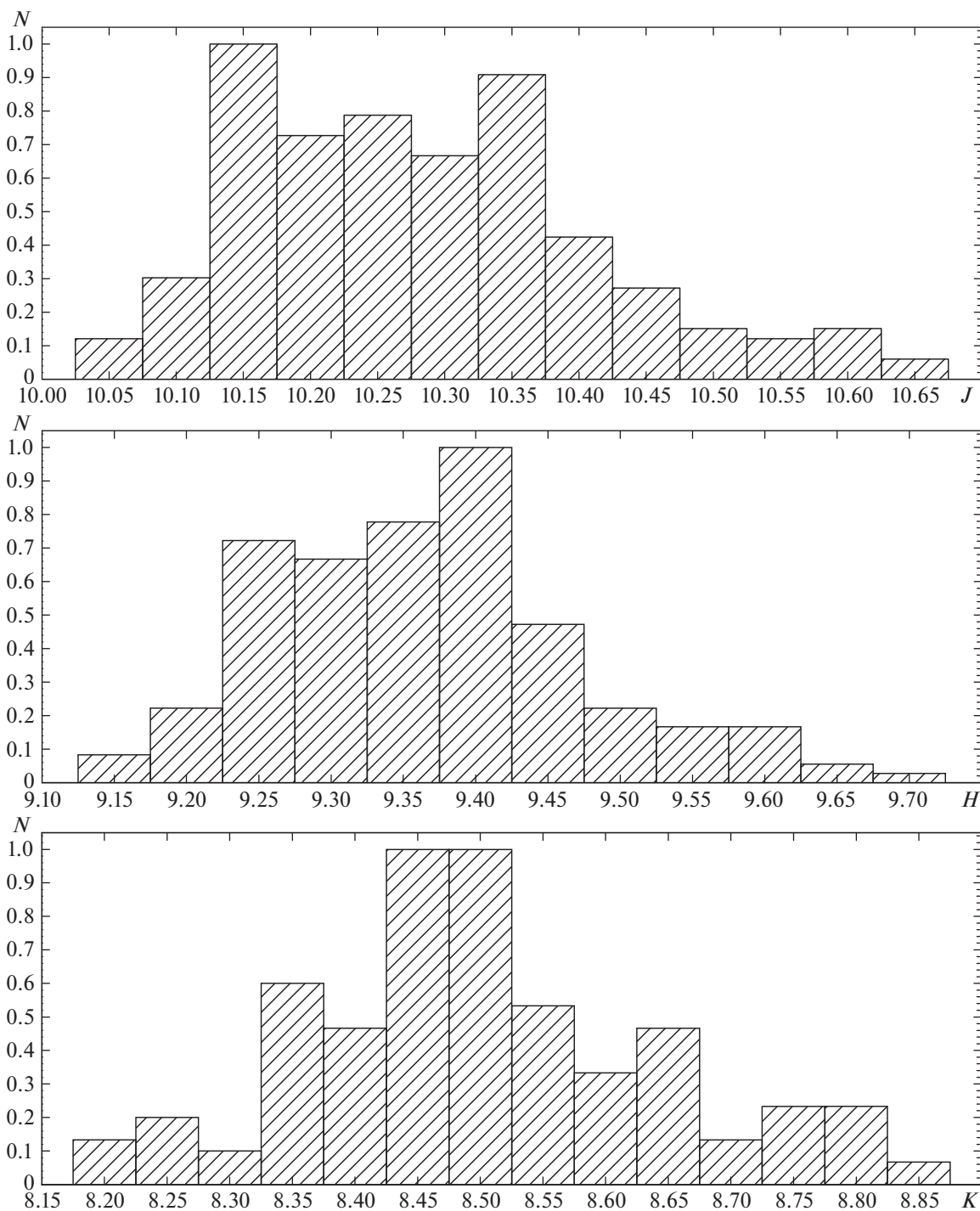


Рис. 3. Нормированные гистограммы активности для VX Cas в ИК-полосах:  $J$  (188 точек),  $H$  (165 точек),  $K$  (165 точек).

лучилось 86 ночей. На рис. 6 представлены диаграммы для звездных величин VX Cas в полосе  $V$  и полосах  $J$  и  $K$  для совпадающих и близких дат. Видно, что блеск в ИК полосах показывает отсутствие корреляции с полосой  $V$ . Исключение составляет полоса  $J$ , для которой коэффициенты

корреляции Пирсона:  $r \sim 0.56$  (для общего массива оптических данных) и  $r \sim 0.69$  (только для данных КраО).

К сожалению, наблюдения в ИК диапазоне практически не попали на моменты глубоких минимумов. Тем не менее некоторое представление

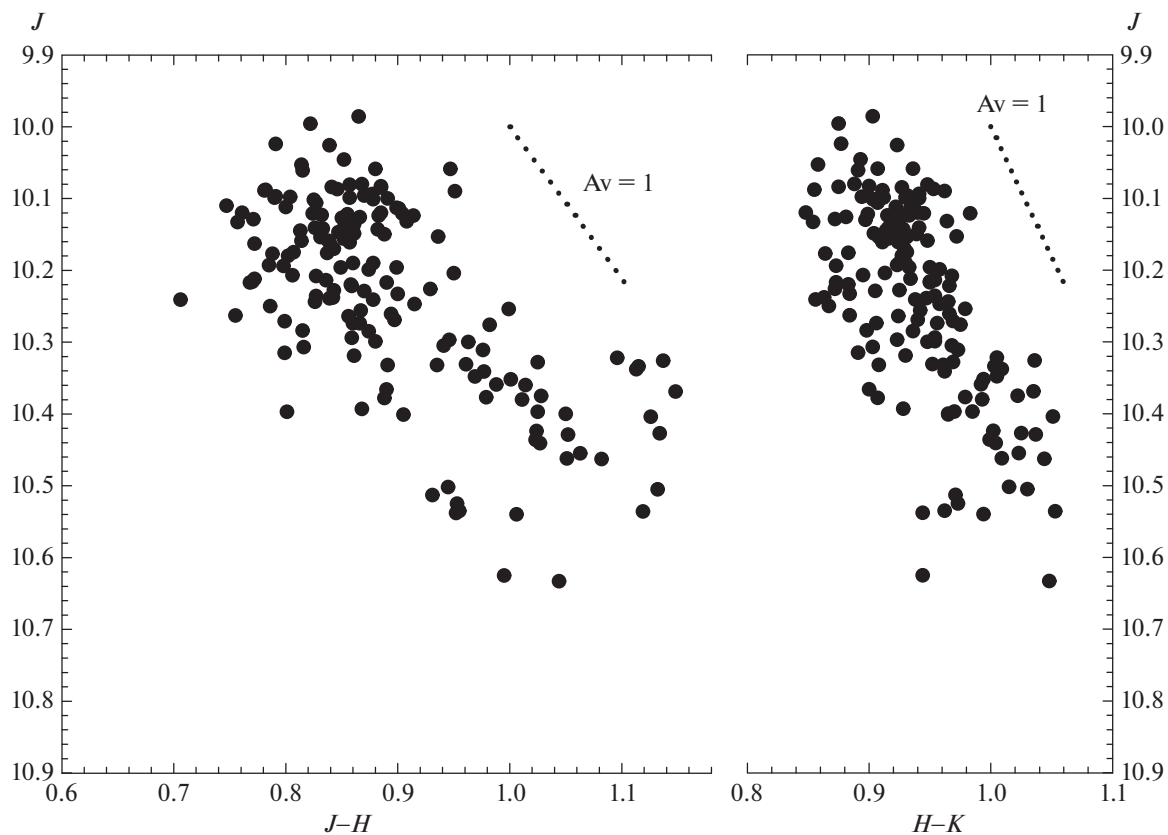


Рис. 4. Диаграмма “цвет–величина” VX Cas для ИК-полос. Пунктирная линия соответствует стандартному закону межзвездного поглощения.

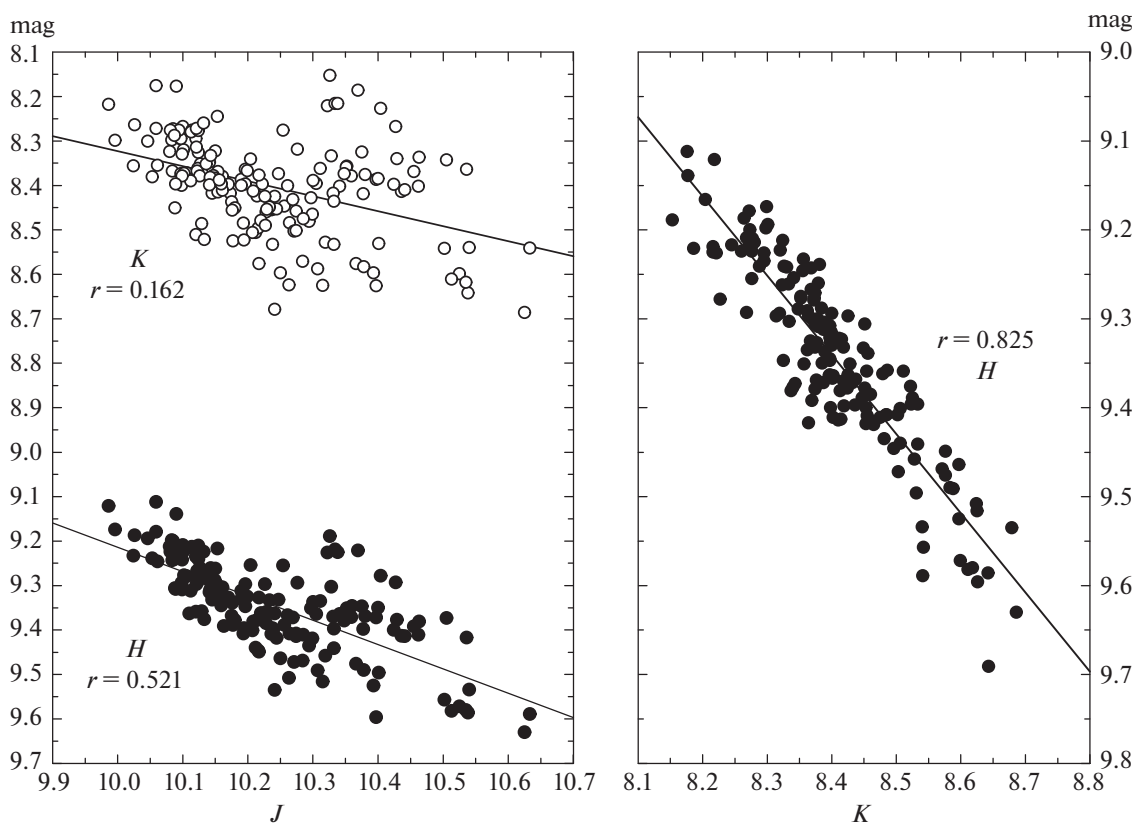


Рис. 5. Диаграммы звездных величин VX Cas: слева –  $H$  и  $K$  относительно  $J$ ; справа –  $H$  относительно  $K$ . Цифрами показан коэффициент корреляции Пирсона.

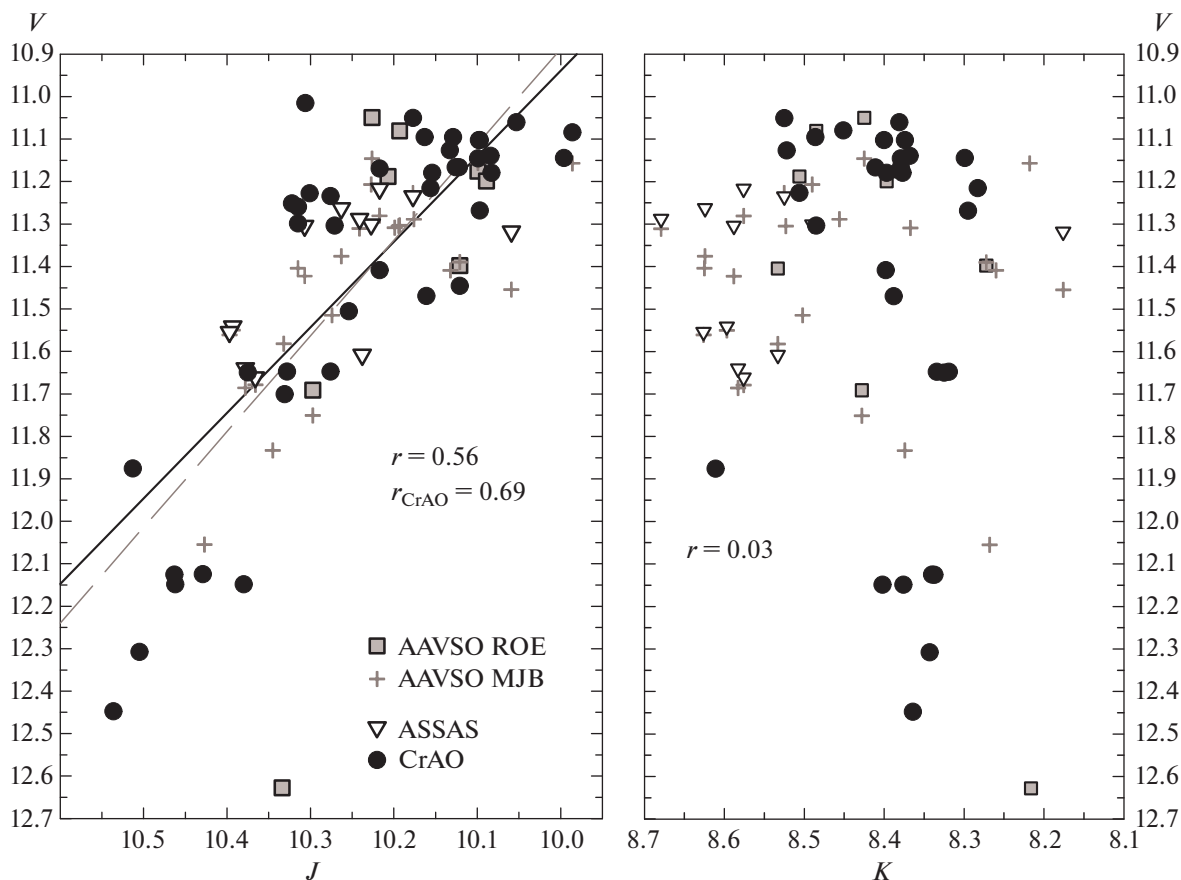


Рис. 6. Корреляция между блеском VX Cas в оптическом (полоса  $V$ ) и ИК-диапазонах (полосы  $J$  и  $K$ ). Цифрами показан коэффициент корреляции Пирсона. Индексом “CrAO” обозначен коэффициент, вычисленный только для данных, полученных в КрАО (штриховая линия).

о поведении блеска звезды при его ослаблении мы можем получить. Мы выбрали несколько отрезков на кривой блеска, содержащих достаточное для анализа количество точек в обоих диапазонах (рис. 7). В этих интервалах блеск VX Cas ведет себя по-разному: иногда в ИК диапазоне тоже наблюдается ослабление блеска, не такое глубокое, как в  $V$  (интервал VI или VIII); а иногда (как, например, на интервале I или VII), оптическое и ИК-поведение звезды не демонстрирует сходства. Даже полоса  $J$  не показывает сильного ослабления блеска, как мы могли бы ожидать, так как в ней все еще сильно влияние излучения звезды.

На рис. 8 (левая панель) представлены кривые блеска в полосах  $VJHK$ , для интервала времени JD 245 5490–245 5530, имеющего достаточно наблюдений и в ИК, и в оптическом диапазоне, чтобы проследить поведение блеска звезды на более мелких временных масштабах. В полосе  $V$  виден отчетливый восходящий тренд, в то время как в ИК полосах его не наблюдается. Поскольку точки располагались близко, для построения диаграмм звездных величин была использована интерполя-

ция звездных величин в полосе  $V$  на момент наблюдения в полосах  $JHK$  (правая панель). Видны сильная корреляция между потоками в полосах  $V$ ,  $J$  и  $H$  (коэффициент Пирсона 0.98 и 0.73 соответственно) и отсутствие корреляции между полосами  $V$  и  $K$ .

Как было уже сказано выше, исследования [18, 38] обнаружили корреляцию изменений блеска в оптической и ИК-области, однако следует напомнить, что количество наблюдательных ночей в данных работах невелико (всего 8). В статье Колотилова и др. [36] была обнаружена антикорреляция, однако точность их наблюдений заметно хуже (ошибки  $\sim 0.1$ – $0.2^m$ ). Как мы видим, наш вывод не противоречит результатам этих работ, а наоборот, является более широким и более надежно установленным, так как VX Cas может демонстрировать как корреляцию, так и антикорреляцию, или вообще не демонстрировать никакой корреляции между изменениями блеска в оптическом и ИК-диапазонах. Это означает, что механизмы изменения блеска звезды в этих участках



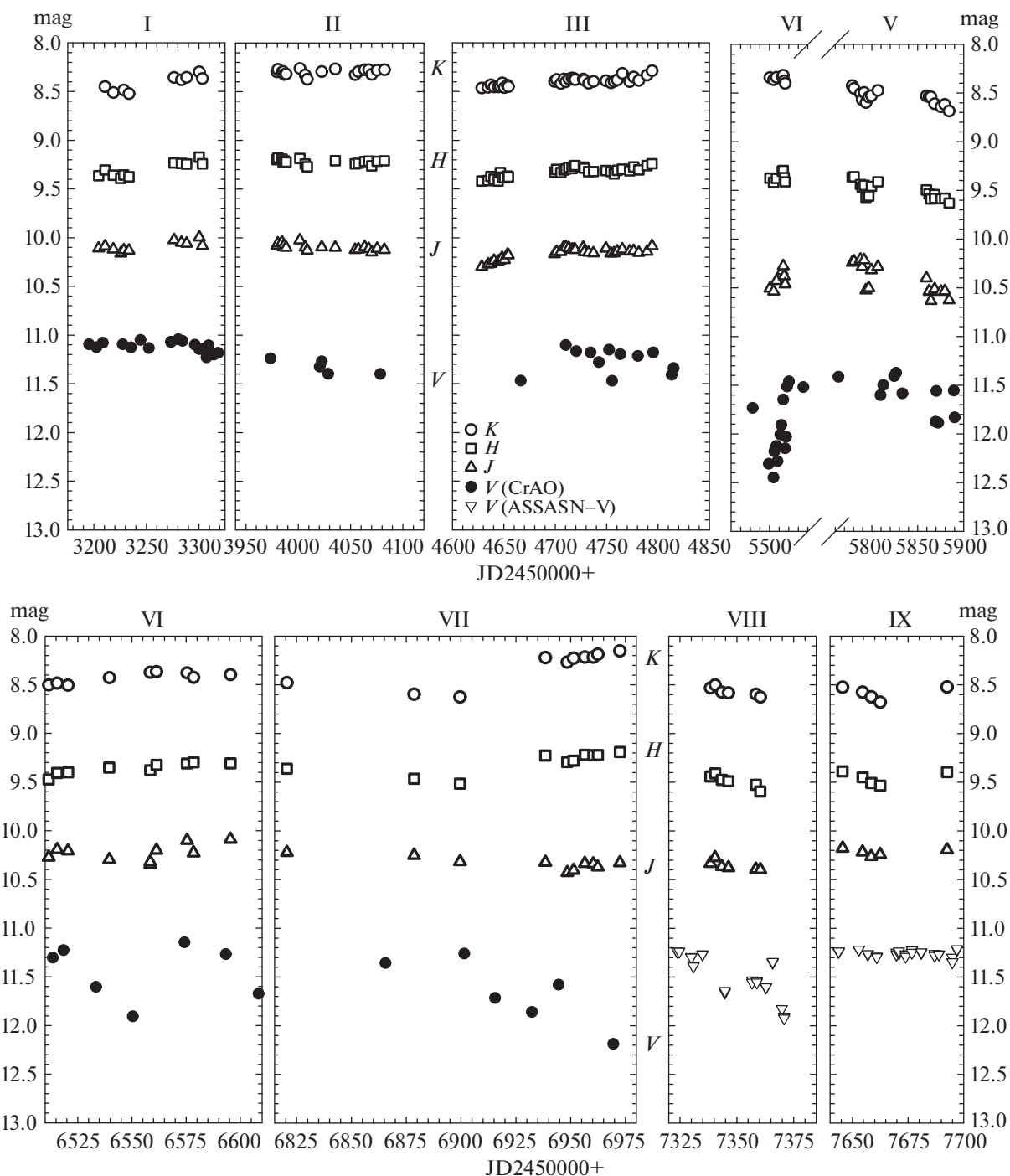


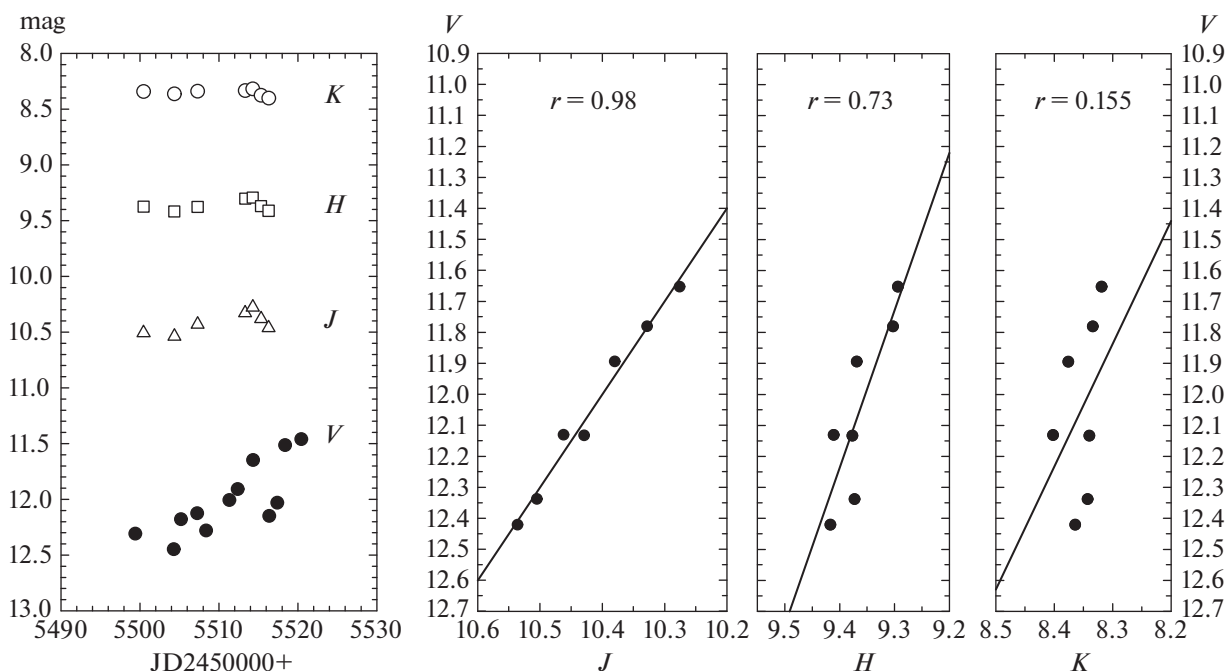
Рис. 7. Кривые блеска VX Cas для избранных интервалов времени, отмеченных римскими цифрами.

спектра могут быть совершенно разными по своей природе.

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Фотометрическая активность VX Cas в полосе *J* в значительной степени определяется изменениями околосредной экстинкции в ближайшем окружении звезды. Это вполне понятно, поскольку значительный вклад в излучение в этой полосе дает сама звезда. Влияние околосредной экстинкции уменьшается при переходе к полосам



**Рис. 8.** Слева: фрагменты кривых блеска VX Cas в полосах  $VJHK$ . Справа: диаграммы звездных величин  $JHK$  относительно  $V$  (подробности см. в тексте). Цифрами показан коэффициент корреляции Пирсона.

$H$  и  $K$ . В результате корреляция между изменениями блеска в оптической области спектра и в полосе  $K$  практически отсутствует. Ранее аналогичный вывод был сделан по данным ИК-наблюдений для ряда других звезд типа UX Ori [3, 6].

2. Сравнение с оптической фотометрией показало, что во время глубоких оптических минимумов блеск VX Cas в полосе  $H$  и особенно в  $K$  может возрастать, т.е. он находится в антикорреляции с блеском в полосе  $V$ . Эта особенность наблюдалась ранее у некоторых других звезд типа UX Ori [3]. Для VX Cas она была впервые отмечена в [36]. Такая антикорреляция свидетельствует о том, что затмения звезд в этих эпизодах были вызваны горячей пылью, находившейся в ближайших к звезде областях протопланетного диска. Для ее объяснения была предложена модель, в которой затмение звезды происходило в результате усиления дискового ветра вблизи зоны сублимации пыли [43]. В этом случае частицы пыли, увлекаемые ветром, поглощают излучение звезды и переизлучают его в ближней ИК области спектра. Самосогласованная модель таких затмений была недавно рассмотрена в статье [44] применительно к звезде Ae Хербига HD 163 296.

Таким образом, фотометрическая активность VX Cas в ближней ИК области спектра имеет много общего с активностью других звезд типа UX Ori, исследованных на больших интервалах вре-

мени [3, 6]. Из всех исследованных в этих статьях звезд VX Cas имеет максимальную амплитуду ИК переменности в полосе  $K$ .

3. Изменения блеска в полосе  $K$  и, частично, в полосе  $H$  вызваны возмущениями в протопланетном диске в области сублимации пыли. Оценки показывают, что в случае VX Cas эта область находится на расстоянии  $R_S \approx 0.19$  а.е. [45].

4. Характерные времена изменения блеска в ИК полосах составляют от нескольких недель до нескольких лет. Один из механизмов, который может вызывать флуктуации ИК блеска молодых звезд на таких временах, описан в статье Хайбрахманова и др. [4]. Трубки с магнитным потоком образуются в результате неустойчивости Паркера в областях с сильным магнитным полем, и “всплывают” на поверхность диска, унося избыточный магнитный поток. Такие трубки содержат пылевые частицы, а значит, способны поглощать излучение звезды и переизлучать его в ИК-диапазоне. Характерные времена таких процессов на расстоянии порядка  $R_S$  составляют несколько месяцев. Важную роль в создании неоднородной пылевой атмосферы диска могут играть также заряженные пылинки. Магнитное поле диска может управлять их движением и поднимать на большую высоту [46], увеличивая, тем самым, эффективную толщину внутренних областей диска. Таким образом, существуют разные механизмы,

поднимающие пыль над поверхностью протопланетных дисков и влияющие как на оптическое, так и на инфракрасное излучение молодых звезд. Важную роль в их изучении играют наблюдения звезд типа UX Ori в видимой и ИК областях спектра. Они позволяют получать прямую информацию о колонковой плотности пыли на луче зрения и ее изменениях во времени. Чтобы проследить за динамикой таких процессов, необходимы длительные и достаточно плотные во времени ряды наблюдений.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 075-15-2020-780.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы наблюдения AAVSO и ASSAS. Авторы благодарны Л.В. Тамбовцевой за обсуждение статьи и полезные замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V. P. Grinin, N. N. Kiselev, N. Kh. Minikhulov, G. P. Chernova, and N. V. Voshchinnikov*, *Astrophys. Space Sci.* **186**(2), 283 (1991).
2. *A. Natta, T. Prusti, R. Neri, D. Wooden, V. P. Grinin, and V. Mannings*, *Astron. and Astrophys.* **371**, 186 (2001).
3. *В. И. Шенаврин, А. Н. Ростопчина-Шаховская, В. П. Гринин, Т. В. Демидова, Д. Н. Шаховской, С. П. Белан*, *Астрон. журн.* **93**, 747 (2016).
4. *S. Khaibrakhmanov, A. Dudorov, and A. Sobolev*, *Res. Astron. and Astrophys.* **18**, 90 (2018).
5. *В. И. Шенаврин, В. П. Гринин, А. Н. Ростопчина-Шаховская, Т. В. Демидова, Д. Н. Шаховской, С. П. Белан*, *Астрон. журн.* **94**, 44 (2017).
6. *В. И. Шенаврин, В. П. Гринин, А. Н. Ростопчина-Шаховская, Т. В. Демидова, Д. Н. Шаховской*, *Астрон. журн.* **89**, 424 (2012).
7. *J. Balanovsky*, *Astron. Nachricht.* **208**, 34 (1918).
8. *M. Vioque, R. D. Oudmaijer, D. Baines, I. Mendigutia, and R. Perez-Martinez*, *Astron. and Astrophys.* **620**, id. A128 (2018).
9. *D. A. Weintraub*, *Astrophys. Space Sci.* **74**, 575 (1990).
10. *G. U. Kovalchuk and A. F. Pugach*, *Astron. and Astrophys.* **325**, 1077 (1997).
11. *S. J. Thomas, N. S. van der Bliik, B. Rodgers, G. Dopptmann, and J. Bouvier*, *Proc. IAU Symp.* **240**, 250 (2007).
12. *H. E. Wheelwright, R. D. Oudmaijer, and S. P. Goodwin*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **401**, 1199 (2010).
13. *A. Mora, B. Merin, E. Solano, B. Montesinos, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **378**, 116 (2001).
14. *J. Y. Seok and A. Li*, *Astrophys. J.* **835**, id. 291 (2017).
15. *T. Liu, H. Zhang, Y. Wu, S.-L. Qin, and M. Miller*, *Astrophys. J.* **734**, id. 22 (2011).
16. *I. Mendigutia, N. Calvet, B. Montesinos, A. Mora, J. Muzerolle, C. Eiroa, R. D. Oudmaijer, and B. Merin*, *Astron. and Astrophys.* **535**, id. A99 (2011).
17. *A. N. Rostopchina*, *Astron. Rep.* **43**, 113 (1999).
18. *C. Eiroa, R. D. Oudmaijer, J. K. Davies, D. de Winter, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **384**, 1038 (2002).
19. *J. A. Valenti, A. A. Fallon, and C. M. Johns-Krull*, *Astrophys. Space Sci.* **147**, 305 (2003).
20. *I. Mendigutia, C. Eiroa, B. Montesinos, A. Mora, R. D. Oudmaijer, B. Merin, and G. Meeus*, *Astron. and Astrophys.* **529**, id. A34 (2011).
21. *В. П. Гринин, А. Н. Ростопчина*, *Астрон. журн.* **73**, 194 (1996).
22. *J. Gurtler, C. Friedemann, H.-G. Reimann, E. Splittgerber, and E. Rudolph*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **140**, 293 (1999).
23. *С. А. Артеменко, К. Н. Гранкин, П. П. Петров*, *Астрон. журн.* **87**, 186 (2010).
24. *V. S. Shevchenko, K. N. Grankin, M. A. Ibragimov, S. Yu. Mel'nikov, and S. D. Yakubov*, *Astrophys. J. Suppl.* **202**, 121 (1993).
25. *V. S. Shevchenko, K. N. Grankin, M. A. Ibragimov, S. Yu. Mel'nikov, and S. D. Yakubov*, *Astrophys. J. Suppl.* **202**, 137 (1993).
26. *R. Percy, S. Grynko, R. Seneviratne, and W. Herbst*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122**, 753 (2010).
27. *В. И. Кардополов, Г. К. Филиппев*, *Перемен. звезды* **22**, 103 (1985).
28. *В. И. Кардополов, Г. К. Филиппев*, *Перемен. звезды* **22**, 153 (1985).
29. *В. И. Кардополов, Г. К. Филиппев*, *Перемен. звезды* **22**, 455 (1987).
30. *S. Glass and M. V. Penston*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **167**, 237 (1974).
31. *Wm. B. Weaver and G. Jones*, *Astrophys. Space Sci.* **78**, 239 (1992).
32. *G. Meeus, L. B. F. M. Waters, J. Bouwman, M. E. van den Ancker, C. Waelkens, and K. Malfait*, *Astron. and Astrophys.* **365**, 476 (2001).
33. *B. Acke, M. E. van den Ancker, and C. P. Dullemond*, *Astron. and Astrophys.* **436**, 209 (2005).
34. *Д. Н. Шаховской, А. Н. Ростопчина, В. П. Гринин, Н. Х. Минукулов*, *Астрон. журн.* **80**, 331 (2003).
35. *В. П. Гринин*, *Письма в Астрон. журн.* **14**, 65 (1988).
36. *Е. А. Колотилов, Г. В. Зайцева, В. И. Шенаврин*, *Астрофизика* **13**, 449 (1977).
37. *H.-W. Zhang and Y.-F. Wu*, *Chin. Astron. and Astrophys.* **20**, 326 (1996).
38. *C. Eiroa, F. Garzon, A. Alberdi, D. de Winter, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **365**, 110 (2001).

39. *V. И. Шенаврин, О. Г. Таранова, А. Э. Наджип*, Астрон. журн. **88**, 34 (2011).
40. *R. D. Oudmaijer, J. Palacios, C. Eiroa, J. K. Davies, et al.*, Astron. and Astrophys. **379**, 564 (2001).
41. *F. D'Alessio, A. Di Cianno, A. Di Paola, C. Giuliani, et al.*, in Proc. SPIE *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*, edited by I. Masanori and A. F. Moorwood, **4008**, 748, (2000).
42. *E. Brocato and M. Dolci*, Mem. Soc. Astron. Ital. **74**, 110 (2003).
43. *В. П. Гринин, А. А. Архаров, О. Ю. Барсунова, С. Г. Сергеев*, Письма в Астрон. журн. **35**, 912 (2009).
44. *M. Pikhartova, Z. C. Long, K. D. Assani, R. B. Fernandes, et al.*, Astrophys. J. **919**, id. 64 (2021).
45. *J. Guzman-Diaz, I. Mendigutia, B. Montesinos, R. D. Oudmaijer, et al.*, Astron. and Astrophys. **650**, id. A182 (2021).
46. *N. J. Turner, M. Benisty, C. P. Dullemond, and S. Hirose*, Astrophys. J. **780**, id. 42 (2014).