Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 131–134.

УДК 524.3
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-131
Orcid 0009-0000-5239-7845

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ЗВЁЗД ТИПА Т ТЕЛЬЦА В МОЛОДОМ СКОПЛЕНИИ IC 348 НА ИНСТРУМЕНТАХ САЯНСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИСЗФ СО РАН

Н.А. Постоенко[1], И.С. Потравнов[1, 2], М.В. Еселевич[1]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, postoenko.n.a@iszf.irk.ru
[2]Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

SPECTRAL MONITORING OF T TAURI STARS IN THE YOUNG CLUSTER IC 348 AT THE ISTP SB RAS SAYAN SOLAR OBSERVATORY

N.A. Postoenko[1], I.S. Potravnov[1, 2], M.V. Eselevich[1]

1Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, postoenko.n.a@iszf.irk.ru
2Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia

Аннотация. Представлены результаты спектрального мониторинга пяти звезд типа Т Тельца в скоплении IC 348, выполненного в 2025–2026 гг. на 1.6-м телескопе АЗТ-33ИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН со спектрографом низкого разрешения ADAM. Выборка включает как классические звезды Т Тельца (V712 Per, V909 Per), так и звезды Т Тельца со слабыми эмиссионными линиями (V695 Per, V715 Per, V716 Per). Мониторинг проводился в области эмиссионной линии Hα, являющейся индикатором аккреционной активности. С помощью построения фазовых кривых исследуется вопрос модуляции переменности эквивалентной ширины Hα с периодом осевого вращения звезд и реализации у них механизма переменности типа AA Tau. Полученные наблюдательные ряды будут в дальнейшем использованы в анализе совместно с фотометрическими данными для исследования механизмов взаимодействия аккреции и околозвездной экстинкции.

Ключевые слова: звезды Т Тельца, спектральная переменность, аккреция, околозвездная экстинкция.

Abstract. We present the results of spectral monitoring of five T Tauri stars in the cluster IC 348, carried out in 2025–2026 with the 1.6-m AZT-33IK telescope of the ISTP SB RAS Sayan Solar Observatory equipped with the low-resolution ADAM spectrograph. The sample includes both classical T Tauri stars (V712 Per, V909 Per) and weak-line T Tauri stars (V695 Per, V715 Per, V716 Per). The monitoring was performed in the region of the Hα emission line, which serves as an indicator of accretion activity. By constructing phase curves, we investigate the possible modulation of the Hα equivalent width variability with the stellar rotation period and the realization of the AA Tau-type variability mechanism. The obtained observational series will be further used in an analysis together with photometric data to study the mechanisms of interaction between accretion and circumstellar extinction.

Keywords: T Tauri stars, spectral variability, accretion, circumstellar extinction.

ВВЕДЕНИЕ

Звезды типа Т Тельца — это молодые солнечноподобные объекты, находящиеся на стадии эволюции до Главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга — Рассела [Петров, 2003]. Они окружены газопылевыми протопланетными дисками, взаимодействующими со звездой в режиме магнитосферной аккреции. В зависимости от темпа аккреции выделяют классические звезды Т Тельца (CTTS) и звезды со слабыми эмиссионными линиями (WTTS), находящиеся на стадии диссипации внутренних областей диска. Звезды типа Т Тельца демонстрируют спектральную и фотометрическую переменность, которая может быть вызвана различными факторами. К ним относятся вращательная модуляция излучения запятненной (как холодными, так и горячими аккреционными пятнами) поверхности звезды, стохастические изменения околозвездной экстинкции при прохождении пылевых сгустков по лучу зрения, а также периодическое экранирование внутренним краем диска, возмущенным наклонной магнитосферой (переменность AA Tau) [Bouvier et al., 1999], и др. Теоретические работы [Nagel, Bouvier, 2020] показали, что благодаря низкой светимости звезд типа Т Тельца крупная пыль может выживать в магнитосфере и увлекаться аккрецирующим газом, формируя оптически толстый слой, который увеличивает эффективный вертикальный масштаб диска на границе магнитосферы и, соответственно, околозвездную экстинкцию. Таким образом, следует ожидать, что у звезд типа Т Тельца существует связь между вариациями темпа аккреции и изменениями околозвездной экстинкции.

Для наблюдательного исследования этой связи необходимы как длительные фотометрические ряды, позволяющие фиксировать изменения блеска и характера переменности, так и спектральный мониторинг, позволяющий контролировать уровень аккреционной активности. Многолетняя программа фотометрических наблюдений скопления IC 348 [Барсунова и др., 2022], инициированная В.П. Грининым в ГАО РАН в сотрудничестве с другими обсерваториями, выявила в этом скоплении несколько звезд типа Т Тельца, переменность которых может представлять собой комбинацию двух механизмов, вызванных переменной околозвездной экстинкцией: фотометрической активности типа UX Ori и периодических колебаний, характерных для переменности типа AA Tau. Среди этих объектов наиболее подробно к настоящему моменту исследована звезда V715 Per. Согласно работе [Гринин

и др., 2024], на интервале более 20 лет у нее зафиксирована радикальная смена фотометрического поведения – от эпохи алголеподобных минимумов к доминирующей периодической переменности типа AA Tau, что объясняется вариациями темпа аккреции. В развитие этих результатов нами продолжен и расширен спектральный мониторинг на Саянской солнечной обсерватории, начатый в 2021 г. с V715 Per [Гринин и др., 2024]. Для этого отобраны пять звезд: V695 Per, V712 Per, V715 Per, V716 Per, V909 Per, выделенных в фотометрической программе. Данная работа представляет результаты наблюдений, выполненных в 2025–2026 гг., и посвящена исследованию переменности эквивалентной ширины (EW) эмиссионной линии Hα — индикатора аккреционной активности.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Спектральные наблюдения выполнялись на 1.6-м телескопе АЗТ-33ИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН в период с марта 2025 по март 2026 г. Телескоп оснащен спектрографом низкого разрешения ADAM [Афанасьев и др., 2016] с разрешением $R \approx 1300$ и дисперсией ≈ 3.6 Å/pix. Длиннощелевые спектры были получены в диапазоне $\Delta\lambda \approx 6400 - 10\,000$ Å с использованием гризмы VPGH600R (600 штр./мм) и с щелью 1.5″ в проекции на небесную сферу. Спектры регистрировались высокочувствительной камерой NEWTON (ANDOR) на базе ПЗС-приемника E2V CCD30-11 с размером пикселя 26 мкм и форматом кадра 1024×256.

Наблюдения проводились в четыре этапа: 14–31 марта 2025 г., 12–19 ноября 2025 г., 13–19 февраля 2026 г. и 19–25 марта 2026 г. За одну ночь наблюдались от одного до пяти объектов программы. Для каждого объекта было получено 2–3 кадра с экспозицией 600 с, которые затем суммировались при обработке. Итоговая величина отношения сигнала к шуму в спектрах составляла $S/N \approx$ 10–90 в зависимости от блеска объекта и погодных условий. Каждую ночь записывались также наборы калибровочных кадров: кадры темнового тока (bias), кадры кварцевой лампы для коррекции плоского поля (flat-field), спектр Ne-Ar лампы для калибровки шкалы длин волн. Абсолютная спектрофотометрическая калибровка осуществлялась на основе квазисинхронных наблюдений звезды-стандарта G191-B2B.

Обработка спектров выполнялась в пакете IRAF по стандартной методике: коррекция темнового тока и деление изображений на нормализованное плоское поле, калибровка длин волн, идентификация положения спектра на кадре, определение области фона и экстракция одномерных спектров. Спектрофотометрическая калибровка включала построение кривой спектральной чувствительности по наблюдениям стандарта с учетом коррекции за атмосферную экстинкцию и применение ее к спектрам объектов.

Некоторые параметры объектов и общее количество ночей, в которые были получены их спектры, приведены в табл. 1. Периоды осевого вращения, необходимые для построения фазовых кривых, взяты из литературы: для V715 Per из статьи [Гринин и др., 2024], для остальных объектов — из работы [Барсунова и др., 2022].

Таблица 1. Информация об исследуемых объектах

Объект	Тип	Спектр. класс	P, дни	N, наблюдений
V695 Per	WTTS	M3.75	7.6	22
V712 Per	CTTS	K6	8.6	9
V715 Per	WTTS	K6	5.22	23
V716 Per	WTTS	M1.25	7.5	23
V909 Per	CTTS	G8	6.536	17

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе полученных спектров звезд были проведены измерения эквивалентной ширины (EW) линии Hα, которая вычислялась прямым интегрированием профиля эмиссионной линии. Измерения проводились на спектрах, нормированных относительно уровня континуума. Ошибка измерений EW(Hα) оценивалась согласно методу, приведенному в работе [Vollmann, Eversberg, 2006], в котором стандартное отклонение определяется как

$$\sigma(EW) = \sqrt{1 + \frac{\underline{F_c}}{\underline{F}}} \cdot \frac{(\Delta\lambda - EW)}{S/N}, \qquad (1)$$

где $\underline{F_c}$ и $\underline{F}$ — средние потоки в континууме и линии соответственно в интервале длин волн $\Delta\lambda$, занимаемом эмиссионной линией.

На рис. 1 представлены фазовые кривые переменности EW(Hα) в спектрах исследуемых звезд, свернутые с фотометрическими периодами осевого вращения, указанными в табл. 1. В качестве начального момента для всех звезд, кроме V715 Per, были взяты моменты первых спектральных наблюдений. Для V715 Per был выбран максимум фотометрического блеска звезды по данным наблюдений 2021–2023 гг. [Гринин и др., 2024].

Как можно было ожидать, у классических звезд Т Тельца (V712 Per и V909 Per), активно аккрецирующих вещество из диска, эмиссия Hα значительно интенсивнее, чем у звезд типа WTTS (V695 Per, V715 Per, V716 Per), для которых характерен меньший темп аккреции и, соответственно, меньшая интенсивность и амплитуда переменности эмиссионной линии. На фазовых кривых всех пяти объектов прослеживается переменность EW(Hα) на временном масштабе нескольких суток, модулированная с периодами осевого вращения и превышающая ошибки измерений. Для трех WTTS эти периоды (7.6, 5.22 и 7.5 сут) были установлены или уточнены по фотометрическим данным [Барсунова и др., 2022; Гринин и др., 2024], и наши спектральные наблюдения действительно выявили модуляцию с теми же периодами. У классических звезд V909 Per и V712 Per известные из литературы периоды подтверждены не были и в работе [Барсунова и др., 2022] рассматривались как квазипериоды. Тем не

менее на их фазовых кривых также заметны признаки периодической модуляции. Детальное рассмотрение этого вопроса, однако, требует продолжения наблюдений и большей статистики.

Переменность эмиссии в линии Hα с периодом осевого вращения у звезд типа T Тельца может быть вызвана несколькими причинами. Среди них основные это: (1) холодные пятна солнечного типа; (2) изменение условий видимости аккреционной колонки и горячего аккреционного пятна; (3) эффект AA Tau. Вклад хромосферной эмиссии активных областей в наблюдаемый поток линии Hα пренебрежимо мал у классических звезд типа T Тельца, но может давать заметный вклад у звезд WTTS. Напротив, горячие пятна могут модулировать как спектральную, так и фотометрическую переменность у CTTS. Выбор между перечисленными механизмами можно сделать на основе совместного анализа данных фотометрии и спектроскопии. Это является нашей дальнейшей задачей.

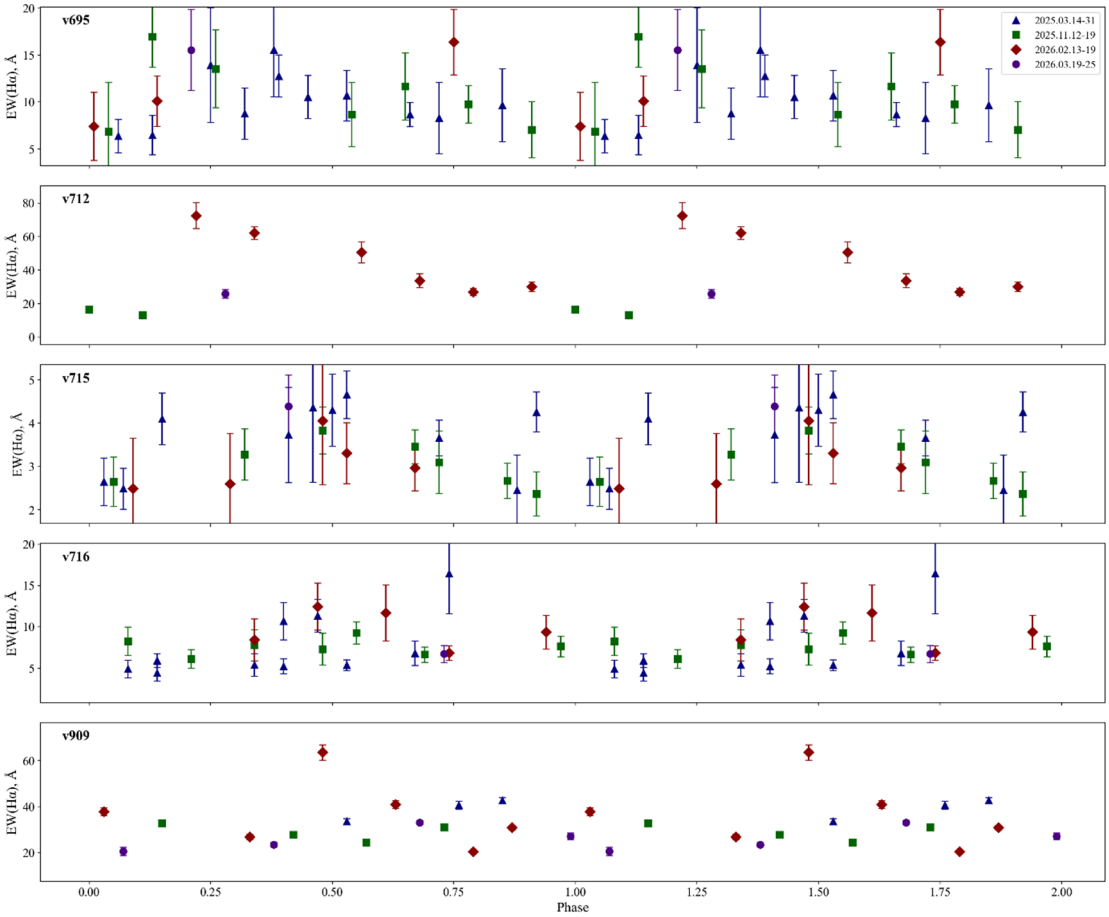

Рис. 1. Фазовые кривые переменности EW(Hα) в спектрах V695 Per, V712 Per, V715 Per, V716 Per и V909 Per, свернутые с периодами из табл. 1. Разными значками и цветами показаны серии последовательных наблюдательных ночей

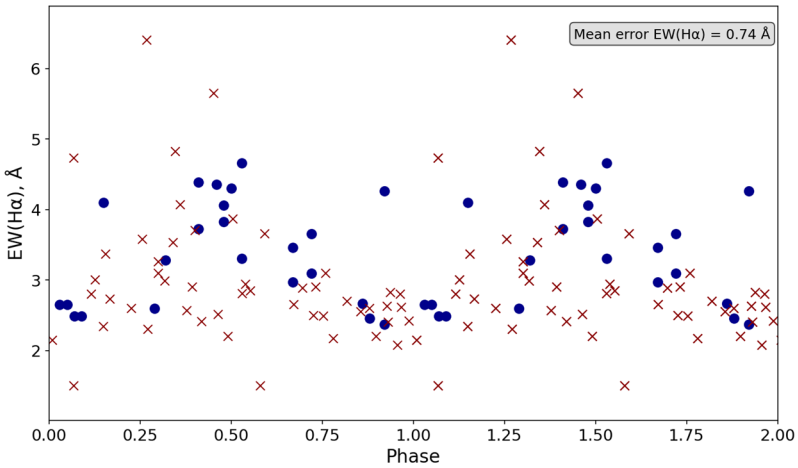

Рис. 2. Сравнение фазовых кривых EW(Hα) в спектре V715 Per. Синими кружками обозначена фазовая кривая по данным сезонов 2025–2026 гг., крестиками — фазовая кривая по данным сезонов 2021–2023 гг., полученная в работе [Гринина и др., 2024]

Особого внимания заслуживает V715 Per — единственный объект нашей программы, для которого существует продолжительный ряд спектральных наблюдений (2021–2023 гг. [Гринин и др., 2024]). Мы сравнили нашу фазовую кривую с полученной ранее (см. рис. 2). Обнаружилось, что, несмотря на прошедший интервал около пяти лет, фаза модуляции эквивалентной ширины осталась практически неизменной: повышенные значения EW(Hα) приходятся на один и тот же диапазон ($\varphi \approx 0.2 - 0.6$).

Ранее для V715 Per была обнаружена антикорреляция блеска и EW(Hα), указывающая на механизм AA Tau как на причину наблюдающейся у звезды периодической малоамплитудной переменности. Обнаруженное нами сохранение фазы переменности EW(Hα) на масштабе ~5 лет также согласуется с этим механизмом, где возмущенная область внутреннего диска твердотельно вращается вместе с магнитосферой, сохраняя азимутальную структуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены первые результаты расширенного спектрального мониторинга звезд типа Т Тельца в молодом скоплении IC 348. Для объектов программы в нескольких наблюдательных сетах в 2025–2026 гг. получены спектроскопические наблюдения и ряды измерений эквивалентной ширины линии Hα. У всех объектов обнаружена переменность на масштабе нескольких суток, сравнимом с периодами осевого вращения. Для V715 Per при сравнении с предыдущими наблюдениями зафиксировано сохранение фазы модуляции эквивалентной ширины линии Hα на интервале около пяти лет, что свидетельствует о стабильности геометрии внутреннего диска.

Дальнейшая работа включает продолжение спектрального мониторинга и совместный анализ данных спектроскопии и фотометрии. Такой анализ позволит исследовать механизмы переменности и связь между вариациями темпа аккреции и изменениями околозвездной экстинкции у объектов выборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Амирханян В.Р., Моисеев А.В. Спектрограф низкого и среднего разрешения АДАМ для 1.6-м телескопа АЗТ-33ИК // Астрофизический бюллетень. 2016. Т. 71, № 3. С. 514–524.

Барсунова О.Ю., Гринин П.В., Сергеев С.Г. и др. Переменные типа UX Ori в скоплении IC 348: результаты многолетнего фотометрического мониторинга // Астрофизика. 2022. Т. 65, № 3. С. 379–396.

Гринин В.П., Потравнов И.С., Еселевич М.В. и др. Взаимодействие аккреции и околозвездной экстинкции как причина необычной переменности WTTS звезды V715 Per // Письма в Астрономический журнал. 2024. Т. 50, № 10. С. 642–652.

Петров П.П. Звезды типа Т Тельца // Астрофизика. 2003. Т. 46, № 4. С. 611–643.

Bouvier J., Chelli A., Allain S., et al. Magnetospheric accretion onto T Tauri star AA Tauri // Astron. Astrophys. 1999. V. 349. P. 619–635.

Nagel E., Bouvier J. The dipper light curve of V715 Persei: is there dust in the magnetosphere? // Astron. Astrophys. 2020. V. 643, A157. 9 p.

Vollmann K., Eversberg T. Remarks on statistical errors in equivalent widths // Astron. Nachr. 2006. V. 327, N 9. P. 789–792.