

О НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРАХ Ар-ЗВЕЗДЫ ϵ UMa

Ю. В. Глаголевский, В. Д. Бычков, И. Х. Илиев, И. Д. Найденов,
И. И. Романюк, В. Г. Штоль, Г. А. Чунтонов

ϵ UMa принадлежит к пекулярным звездам с широкими спектральными линиями. Параметры непрерывного спектра в ультрафиолетовой и видимой областях спектра соответствуют эффективной температуре $T_e=9800$ К, профили водородных линий соответствуют $T_e=9500$ К и $\lg g=3.5$. Анализ интенсивностей линий металлов дает $T_e=9650$ К. Звезда относится к «слабопекулярным» звездам с усиленными линиями Cr, Eu, Mn. На основании $v \sin i=35$ км/с, периода вращения $P=5^d.09$ и $\lg g=3.5$ найден радиус звезды $R=5R_\odot$, угол наклона звезды к лучу зрения $i=44^\circ$ и абсолютная величина $M_v=-0^m.3$. Таким образом, звезда находится выше главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга—Рессела. Магнитное поле измерялось на звездном магнитометре 6-метрового телескопа по линиям водорода H_γ и линии Fe II 4520.2, а также по линии H_γ на телескопе Цейс-600 и спектрографе UAGS с поляриметрической приставкой. Основной материал состоит из измерений H_e по линиям водорода. Оказалось, что поле изменяется от -300 до $+600$ Гс. Характер изменений H_e , полученного по линии Fe II 4520.2, отличается от измеренного по линиям водорода, однако этих данных еще мало. Профили линий ряда элементов показывают сложную структуру, что говорит о «пятнистом» их распределении по поверхности.

The star ϵ UMa belongs to stars with wide spectral lines. The parameters of the continuous spectrum in the ultraviolet and visible spectral regions correspond to the effective temperature $T_e=9800$ K and the hydrogen profiles correspond to $T_e=9500$ K and $\lg g=3.5$. The analysis of the intensities of metallic lines gives $T_e=9650$ K. The star belongs to «weak-peculiar» stars having the intensified lines of Cr, Eu, Mn. On the basis of $v \sin i=35$ km/s and period of rotation $P=5^d.09$ and $\lg g=3.5$ the radius of the star $R=5R_\odot$, the inclination angle of the star $i=44^\circ$ to the line of sight and the absolute magnitude $M_v=-0^m.3$ are found. So, the star is above the main sequence on the Hertzsprung-Russell diagram. The magnetic field was measured with the stellar magnetometer of the 6-meter telescope from H_γ and Fe II 4520.2 lines and from H_γ line with the telescope Zeiss-600 and the spectrograph UAGS supplied with polarimetric unit. The main material consists of the measurements of H_e from the hydrogen lines. It was found out that the field varies from -300 to $+600$ Gs. The character of variations of H_e obtained from Fe II 4520.2 line differs from that measured from the hydrogen lines, but these data are yet insufficient. The line profiles of a number of elements show the complex structure that says about their «spotty» distribution over the surface.

1. Введение. Классическая методика дает возможность определения магнитного поля H_e только у звезд, имеющих резкие линии с шириной не более $w=0.3 \text{ \AA}$; если линии шире, то точность измерений резко падает. Большинство пекулярных звезд имеют более широкие линии и существование магнитного поля у них только подозревается. Изучение магнитных полей таких звезд имеет принципиальное значение, так как существует мнение, что наиболее сильные поля присутствуют только у резколинейчатых, медленно вращающихся звезд, а у быстро вращающихся они или слабы, или отсутствуют. С другой стороны, считается, что спектральные аномалии связаны с наличием магнитного поля, а сильные аномалии встречаются также и у Ар-звезд с широкими линиями. Следовательно, может оказаться, что быстро вращающиеся звезды также обладают сильными магнитными полями. В связи с этим возникает вопрос, есть ли

различие физических параметров у Ар-звезд с широкими и узкими линиями?

К настоящему времени хорошо разработана методика измерения H_α фотоэлектрическим способом как по линиям металлов, так и по линиям водорода. Первые измерения поля у звезд с широкими спектральными линиями опубликованы в [1]. Авторы сделали ряд измерений H_α у 16 Ар-звезд. Первое впечатление таково, что магнитное поле у некоторых из них присутствует, но оно относительно невелико — менее 1 кГс, хотя отдельные измерения дают величины до 1000—1800 Гс. Отдельные оценки совершенно не решают проблемы, тем более, что в работе [2] найдено, что амплитуда H_α , измеренного по водородным линиям, в 1.5 раза меньше той, которая получается классическим фотографическим способом по линиям металлов. Это говорит о том, что необходимы всесторонние исследования. Кроме того, неизвестно, каков характер изменения поля этих звезд и какова структура поля на их поверхности.

2. Общие свойства. В программу наших исследований Ар-звезд с широкими линиями входит звезда ϵ Uma, для которой уже есть ряд измерений поля [1]. Эта звезда имеет ширину спектральных линий $w > 0.6 \text{ \AA}$ и входит в список звезд [3], у которых магнитное поле вероятно.

Одним из важных параметров, необходимых для дальнейшего анализа, является эффективная температура T_e . Согласно показателям цвета в системе UBV , $T_e = 9900 \text{ K}$. Эту температуру мы оценили с помощью эмпирических соотношений [4]. В работе [5] приведена $T_e = 9400 \text{ K}$, она определена по распределению энергии в непрерывном спектре. В работе [6] также приводится оценка $T_e = 10\,200 \text{ K}$, полученная по показателям цвета. По величине бальмеровского скачка D и спектрофотометрическим градиентам в ультрафиолетовой φ_1 и голубой φ_2 областях спектра получается $T_e = 9900 \text{ K}$. В отличие от большинства других Ар-звезд эти параметры полностью совпадают с аналогичными параметрами нормальных звезд главной последовательности, имеющих $\text{Sp} = A0 \div A0.5$ [7]. Ультрафиолетовый индекс $r_5 = \frac{I(2400 \text{ \AA})}{I(2740 \text{ \AA})}$ соответствует $T_e = 9600 \text{ K}$ [8]. Приведенные оценки характеризуют распределение энергии в непрерывном спектре. Среднее из всех этих оценок значение $T_e = 9800 \pm 150 \text{ K}$. Видно, что составляющие ее значения не сильно различаются между собой, свидетельствуя об отсутствии заметных аномалий в распределении энергии в непрерывном спектре в широком диапазоне длин волн. Исключение составляет область $\lambda < 1500 \text{ \AA}$, где имеется избыток излучения [8].

Оценки температур по интенсивностям линий водорода [9] дают $T_e = 10\,000 \text{ K}$. В работе [10] приведены спектральные классы, определенные по интенсивностям линий He, H и K (Ca II), которые оказались B9, B9 и B8 соответственно. В отличие от многих Ар-звезд эти Sp практически одинаковы, что свидетельствует об отсутствии аномалий интенсивностей линий He и, вероятно, только о небольшом ослаблении линии K. С помощью эмпирических зависимостей [11] по этим спектральным классам можно оценить $T_e = 10\,800$, $10\,800$ и $12\,800 \text{ K}$ соответственно. Эти оценки грубы. Для более точного определения температуры мы воспользовались методом сравнения измеренных профилей водородных линий с вычисленными на основе точных моделей [12]. Наблюдаемые профили измерены нами по двум спектрограммам с дисперсией 2.4 \AA/mm , полученным на Куде-спектрографе 2-м телескопа обсерватории Китт-Пик. Выбор наиболее подходящего теоретического профиля осуществлялся на ЭВМ М-222 по программе, составленной В. С. Лебедевым. В результате получены следующие параметры:

$$T_e = 9500 \text{ K}; \lg g = 3.5.$$

Это значение T_e не сильно отличается от полученного по параметрам непрерывного спектра. Использование теоретических профилей из [13]

дало те же значения T_e и I_{gg} . Следовательно, величины T_e , основанные на глазомерных оценках интенсивностей линий He, H и K [10], следует считать завышенными. На основании сказанного можно сделать заключение, что интенсивности водородных линий у ϵ UMa вполне соответствуют распределению энергии в непрерывном спектре. Однако, согласно [14], у ϵ UMa сильно ослаблены линии водорода Пашеновской серии, их интенсивность соответствует $Sp=F0$. Авторы пытаются объяснить это свойство тем, что у ϵ UMa есть холодный спутник. С другой стороны, совершенно нормальное распределение энергии в видимой области спектра не поддерживает этого мнения. Отношение интенсивности излучения ϵ UMa и стандартной звезды α Луг той же температуры в области 3300—7600 Å показывает дефицит излучения на $\lambda \approx 7600$ Å до 25%. Столь значительное отклонение распределения энергии в узком спектральном диапазоне нельзя считать реальным, тем более что отношение интенсивностей излу-

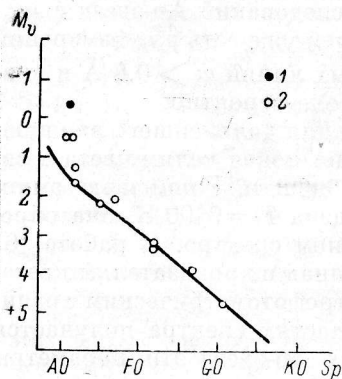


Рис. 1. Диаграмма Герцшпрунга—Рессела из [29] для скопления UMa.

1 — ϵ UMa; 2 — другие звезды скопления.

чения в соответствующих цветах многоцветной фотометрии [15] в диапазоне 3300—11 000 Å показывает, что у ϵ UMa совершенно нормальное распределение энергии, только ее спектрофотометрическая температура на 200—300 К выше, чем у α Луг. Таким образом, вопрос об аномалии интенсивностей линий водорода Пашеновской серии было бы важно исследовать специально. Перейдем к обсуждению температуры, полученной на основании изучения металлического спектра. В [16] показано, что эта температура может значительно отличаться от той, которая выводится из анализа линий водорода и непрерывного спектра для Ар-звезд. Как мы видели выше, линии He и K (Ca II) имеют практически нормальную интенсивность. Методом кривых роста [17] получено $T_e=9850$ К. В этой же работе найдено, что температура возбуждения и ионизации $T_e=8350^\circ$ и $T_{ii}=8100$ К. С помощью известных соотношений [11] $T_v/T_e=0.92$ и $T_{ii}/T_e=0.91$ получаем $T_e=9100$ и 8900 К соответственно. Количественная спектральная классификация, основанная на измерениях интенсивностей линий металлов [18], дает $Sp=B9.5$, чему соответствует $T_e=10\,100$ К [11]. Количественная спектральная классификация, основанная на измерениях интенсивностей групп линий отдельных элементов [19], дает следующие Sp и соответствующие им T_e :

$$\begin{aligned} Sp(\text{He}) &= A0.2 (9850 \text{ К}); & Sp(\text{Fe I}) &= A0.5 (9700 \text{ К}); \\ Sp(\text{Fe II}) &= A0.3 (9800 \text{ К}); & Sp(\text{Ti}) &= A0.0 (9900 \text{ К}). \end{aligned}$$

Видно, что все приведенные значения температур близки, поэтому можно взять среднее арифметическое $T_e=9650 \pm 150$ К, что в пределах ошибок совпадает с предыдущими оценками.

В соответствии с работой [20] ϵ UMa принадлежит к Ар-звездам из-за усиленных линий Cr и Eu. Количественный анализ [21] свидетельствует, что в ее атмосфере приблизительно в 20 раз больше марганца, чем у нормальных звезд того же спектрального класса. В соответствии с [19] звезда ϵ UMa принадлежит к звездам (Cr, Eu)-группы, так как линии Mn усилены в значительно меньшей степени. Критерий «степень пекулярности» P показывает, что ϵ UMa является «умеренной» пекулярной звездой. Вероятно поэтому полученные выше температуры не показывают заметных аномалий. Важным параметром для дальнейшего обсуждения проблемы является $v \sin i$. В каталоге [22] с большим весом приводится значение

$v \sin i = 35$, в [23] — 49 и в [24] — 35 км/с. По-видимому, более вероятным значением является 35 км/с, как полученное по наибольшему числу измерений с использованием больших дисперсий. На основании этой величины оценим угол наклона звезды к лучу зрения. С помощью среднего значения $T_e = 9700$ К и эмпирической зависимости $T_e(R)$ [25] находим радиус звезды $R = 2.57 R_\odot$, предполагая, что ϵ UMa является звездой главной последовательности. После этого по известной формуле находим экваториальную скорость

$$v = \frac{50.6R}{P} = 25.6 \text{ км/с.}$$

Для ϵ UMa период вращения $P = 5^d.09$. Отсюда получаем $\sin i > 1$, следовательно, или звезда не принадлежит к главной последовательности и имеет значительно больший радиус, или период P является неверным. Период $P = 5^d.0887$ был установлен [26] по изменению интенсивностей линий К (Ca II). Затем в [27] было найдено изменение блеска ϵ UMa в голубых ($\lambda_{\text{эф}} = 4400 \text{ \AA}$) и желтых ($\lambda_{\text{эф}} = 5500 \text{ \AA}$) лучах с амплитудой $0^m.025$ без изменения цвета. Максимум блеска совпадает с минимумом интенсивности линии К (Ca II). Кривая блеска имеет вторичный максимум на фазе 0.5, что типично для Ар-звезд. Таким образом, характер изменения блеска и интенсивности линии К указывает на то, что период является правильным. Спектроскопические исследования [28] подтверждают этот период. В фазах 0.3 и 0.73 спектральные линии раздваиваются, что легко объясняется с точки зрения наклонного ротатора, если есть две области концентрации химических элементов, проходящие центральный меридиан в фазах 0 и 0.5.

Таким образом, остается признать, что звезда ϵ UMa не принадлежит главной последовательности и это подтверждается полученным нами значением $\lg g = 3.5$. На основании новых определений [29] абсолютная звездная величина $M_v = -0.2$. В соответствии с данными [4] такая звезда будет иметь $R = 3.1 R_\odot$. На основании построения модели атмосферы ϵ UMa [30] получено $\lg g = 3.2$, из анализа контуров водородных линий [17] $\lg g = 3.5$. Таким образом, все определения $\lg g$ хорошо согласуются. На основании $\lg g = 3.5$, полученного нами, $\lg g = 3.2$, $\lg g = 4.0$ (главная последовательность) и эмпирического соотношения $\lg g (L/L_\odot)$ [25] находим светимость L в единицах светимости Солнца, затем переходим к M_v [4] и по формуле из [25] получаем

$$R = 19.32 - 0.2M_v - 0.2\Delta m_{\text{сол}} - 2 \lg T_e,$$

приведенные в следующей таблице:

$\lg g$	L	M_v	R	i
3.5	2.4	-0.3	5.0	44°
3.2	2.8	-0.8	6.3	34
4.0	1.7	+0.9	2.8	$\sin i > 1$

Наиболее вероятные значения параметров приведены в первой строчке. На рис. 1 дана диаграмма Герцшпрунга—Рессела из [29], где видно, что ϵ UMa находится выше главной последовательности. Остальные точки принадлежат другим членам скопления UMa, к которому относится ϵ UMa, возраст скопления составляет 10^8 лет. Этот факт является очень интересным с точки зрения эволюции Ар-звезд, так как он свидетельствует о том, что Ар-звезды не обязательно находятся на главной последовательности. В работе [18] также показано, что часть звезд Ар находится на верхней части главной последовательности.

3. Измерение магнитного поля. Задача измерения магнитного поля ϵ UMa изложена в п. 1. Наши измерения проводились в основном по водородным линиям, так как линия Fe II 4520.2, на которую настроен звездный магнитометр и с которой мы имеем опыт работы, в данной звезде очень мелкая и широкая. Из-за небольшой крутизны крыльев необходимо набирать при измерениях слишком большое количество фотонов. Кроме того, в работе [1], как уже говорилось, имеется ряд определений H_0 по линиям водорода, и нам было интересно сравнить результаты и даже объединить их для большей точности.

Для измерений поля по линиям водорода был использован звездный магнитометр [31] без эталона Фабри—Перо. Входная и выходная щели

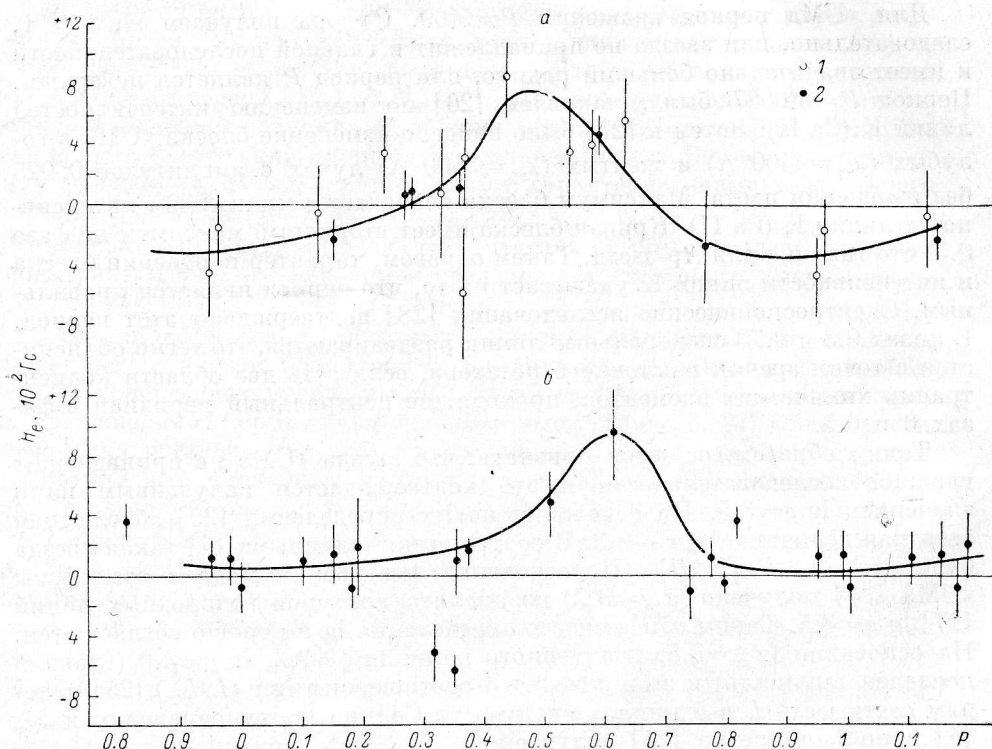


Рис. 2. Зависимость H_0 от фазы фотометрического периода.

a — наши измерения H_0 по линиям H (1 — Цейс-600, 2 — БТА); *b* — измерения Ландстрита и др. [1] по линиям водорода.

при этом раскрывались так, чтобы обеспечить полосу пропускания шириной $\sim 5 \text{ \AA}$. Измерения проводились поочередно в правом и левом крыле на расстоянии 7 \AA от центра линии H_α . Для получения одного измерения поля проводилось не менее пяти пар отсчетов. Средняя квадратическая ошибка измерения σ определялась стандартно. Она обычно превышает ту, которая выводится из статистических соображений. Кроме этого, мы наблюдали ϵ UMa на телескопе Цейс-600 и спектрографе UAGS, в котором перед щелью установлен электрооптический модулятор (водородный магнитограф). Участок спектра шириной 10 \AA вырезался щелью. Методика измерений та же.

На рис. 2, *a* данные измерения H_0 отложены в зависимости от фазы периода фотометрических изменений. Видно, что поле меняется от -300 до $+600 \text{ Гс}$. На рис. 2, *b* приведены результаты измерения из [1]. По этим данным тоже можно проследить переменность поля от $+100$ до $+800 \text{ Гс}$ на фазах $\varphi=0 \pm 0.2$ и $\varphi=0.6$ соответственно. Экстремумы нашей кривой

находятся на фазах $\varphi=0.9$ и 0.45 . Различие фаз положительного максимума составляет $\Delta\varphi=0.15$ и может быть объяснено неточностью периода. В этом случае новый уточненный период будет равен $JD\ 2434131.124+5^d.0884E$. Возможно, сдвиг нереален и обусловлен малым количеством измерений в этом диапазоне фаз.

Общий сдвиг нашей кривой $H_e(P)$ в сторону отрицательных значений на величину $\Delta H_e=250$ Гс может быть вызван вековыми изменениями конфигурации поля. Идентичность нашей системы величин магнитного поля и системы, применяемой в Канаде, была проверена путем измерений H_e у звезды α^2CVn . Измерение H_e делалось и по линии Fe II 4520.2 на магнитографе БТА с эталоном Фабри—Перо. Сканирование линии производилось последовательно в точках через 0.1 \AA , разрешение было 0.09 \AA .

По линии Fe II 4520.2 у ϵUMa было сделано три измерения поля. Интересно то, что если эти данные отложить на предыдущие графики, то они не будут соответствовать общему ходу. Возможно, характер переменности поля, измеренного по Fe, отличается от того, который получается по водороду. Профили линий железа показывают сложную структуру, свидетельствующую о «пятнистом» распределении его по поверхности. Спектры, полученные нами на БТА с дисперсией 1.3 \AA/мм , ясно свидетельствуют о том, что на поверхности ϵUMa некоторые элементы сконцентрированы в отдельных областях. Необходимы дальнейшие измерения H_e по железу и другим элементам и тщательное изучение распределения элементов по поверхности, чтобы выяснить структуру поля и его связь с распределением элементов.

Литература

1. Landstreet J. D., Borra E. F., Angel J. R. P., Illing R. M. E. A search for strong magnetic fields in rapidly rotating Ap stars. — *Astrophys. J.*, **201**, 624—629, 1975.
2. Borra E. F., Vaughan A. H. High resolution polarization observations inside the spectral lines of magnetic Ap stars. II. Observations of α^2CVn . — *Astrophys. J.*, **220**, 924—930, 1978.
3. Babcock H. W. Catalogue of magnetic stars. — *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, No. 30, vol. 3, 1958, p. 141—210.
4. Аллен К. У. Астрофизические величины. М., «Мир», 1977.
5. Schild R., Peterson D. M., Oke J. B. Effective temperature of B and A type stars. — *Astrophys. J.*, **166**, 95—108, 1971.
6. Wolf S. C., Kuhl L. V., Hayes D. The effective temperatures of A and B stars. — *Astrophys. J.*, **152**, 871—884, 1968.
7. Глаголевский Ю. В. Некоторые результаты наблюдений непрерывных спектров магнитных и пекулярных звезд. — *Астроном. ж.*, 1966, **43**, 73—79.
8. Cucchiaro A., Masau-Hercot D., Jaschek M., Jaschek C. Spectral classification from the ultraviolet line feature of S2/68 spectra. — *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, vol. 33, 15—26, 1978.
9. Durrant C. I. Rotation and chemical abundances in the peculiar A stars. II. — *MNRAS*, **147**, 75—93, 1970.
10. Осава К. Catalogue of Ap stars. — *Ann. Tokyo Astron. Obs.*, Ser. 2, **9**, No. 3, 1963.
11. Копылов И. М. О шкале эффективных температур звезд. — *Изв. Кр. АО*, 1963, **30**, 69—89.
12. Kurucz R. Model Atmospheres for G, F, A, B, and O stars. — *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **40**, No. 1, 1—340, 1979.
13. Mihalas D. Balmer line blanketed model atmospheres for A-type stars. — *Astrophys. J. Suppl.*, **13**, No. 114, 1—29, 1966.
14. Бычков В. Д., Витриченко Э. А., Щербатов А. Г. Классификация и методика поиска холодных спутников спектрально-двойных систем в ближней инфракрасной области. — *Изв. Кр. АО*, 1978, **58**, с. 81—88.
15. Johnson H. L., Mitchell R. I. Thirteen-color photometry of 1380 bright stars. — *Revista Mexicana de astron. y astrophys.*, **1**, 299—324, 1975.
16. Глаголевский Ю. В., Козлова К. И., Чунакова Н. М. Об эффективных температурах пекулярных и металлических звезд. — *Изв. САО*, 1973, **5**, с. 52—69.
17. Леушин В. В. Количественный анализ атмосферы ϵUMa . — *Изв. Кр. АО*, 1965, **34**, с. 151—162.

18. Копылов И. М. Двумерная количественная спектральная классификация звезд спектральных классов В8—F2. — Изв. Кр. АО, 1960, 23, с. 148—173.
 19. Леушин В. В. Количественное исследование пекулярностей в спектрах звезд Ар. — Изв. САО, 1971, 3, с. 36—61.
 20. Bertrand Ch. Catalogue et bibliographie des étoiles A à spectra particulier. — Journ. des Observator. Marseille, No. 4-5, 1959.
 21. Burger M., Vander Hucht K. A. Space Research XIV. Akademie-Verlag, Berlin, 1974. 537 S.
 22. Боярчук, Копылов И. М. Сводный каталог скоростей вращения 2558 звезд. — Изв. Кр. АО, 1964, 31, с. 44—99.
 23. Alt H., Chaffee F. H., Suffolk C. — *Astrophys. J.*, 175, 779, N 3, 1972.
 24. Uesugi A., Fukuda I. Catalogue of rotational velocities. — Mem. of Faculty Sci. Kyoto Univ., 33, No. 2, 205—250, 1970.
 25. Копылов И. М. Физические характеристики горячих звезд. — Изв. Кр. АО, 1967, 36, 134—154.
 26. Gutrie P. — Sitz. Preuss. Akad. Berlin, No. 27, 1931; No. 30, 1934.
 27. Provin. Light-variation of peculiar A-stars. — *Astrophys. J.*, 118, 489—500, 1953.
 28. Struve O., Hiltner W. A. Changes in the line contours of ϵ UMa. — *Astrophys. J.*, 98, 225—227, 1943.
 29. Levato H., Abt H. Spectral types in the Ursa Major stream. — *PASP*, vol. 90, 429—433, 1978.
 30. Engin S. Preliminary results of the study of the Cr-star ϵ UMa. — *Physics of Ap stars*, IAU Coll., No. 32, 623—627, 1975.
 31. Глаголевский Ю. В., Чунтонов Г. А., Найденов И. Д., Романюк И. И., Рядченко В. П., Борисенко А. Н., Драбук С. В. Первые измерения магнитных полей звезд на фотоэлектрическом магнитометре 6-м телескопа. — *Сообщ. САО*, 1979, 25, с. 5—15.
-