

**О ФОРМАХ КРИВЫХ БЛЕСКА И КРИВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦВЕТА
ЦЕФЕИД В СИСТЕМЕ U, B, V**

Н. С. Николов, Р. М. Русев, С. Й. Милчева

1. Введение. Первые исследования формы кривых блеска цефеид относятся к двадцатым и тридцатым годам нашего столетия [1, 2, 3, 4]. Хотя эти пионерские работы были основаны на ограниченном и во многих случаях — на неомогенном материале, они выявили ряд закономерностей изменения формы кривых блеска с периодом. И по сей день работа Герцшпрунга [2], где были получены некоторые из основных закономерностей, остается классической. Полное и всестороннее исследование вопроса было сделано Паренаго и Кукаркиным в 1936 году [5]. Ими были использованы нормальные кривые блеска 102 цефеид с периодом больше 1 сутки, полученные визуальными и фотографическими наблюдениями.

В настоящее время накопленные около 10 тысяч фотозлектрических наблюдений цефеид уже приведены в одну фотометрическую систему U, B, V [6, 7]. Таким образом были получены кривые блеска V и кривые показателей цвета $B - V$ и $U - B$ примерно для 300 классических цефеид [8]. Этот материал позволяет заново изучить поведение кривых блеска цефеид с изменением периода на основе уже значительно более точных фотозлектрических наблюдений. Кроме того этот материал позволяет исследовать формы кривых показателей цвета цефеид, что до сих пор не было возможным.

Изучение изменения различных параметров, характеризующих кривых блеска и цвета цефеид, с изменением периода, в настоящее время является тем интереснее в связи со следующим. Как известно, существование соотношения период — светимость у цефеид показывает, что чем длиннее период данной звезды, тем больше ее светимость, а, следовательно, и ее масса. С другой стороны, согласно современным взглядам на эволюции звезд, эволюция данной звезды протекает при постоянной массе и зависит существенным образом от начальной массы звезды [9]. Считается, что цефеиды являются продуктом эволюции В-звезд [10]; пересекая при своей эволюции полосы неустойчивости на диаграмме Герцшпрунга—Рессела, они сохраняют период [11]. Однако существуют указания на то, что при этом меняется

амплитуда кривой изменения их блеска [10] или наклон восходящей ветви этой кривой [12]. Важным результатом сделанных к последним годам расчетов эволюционных треков массивных звезд является то, что цефеиды, эволюируя несколько раз, пересекают полосу неустойчивости [13, 15].

Одним словом, изучение средних зависимостей различных параметров формы кривых блеска от периода, дало бы возможность выявить индивидуальные различия этих параметров у цефеид с данным одинаковым периодом, которые могут быть возможным эволюционным эффектом, что имело бы большое значение для исследования эволюции цефеид.

Для выполнения настоящей работы мы использовали каталог кривых блеска и показателей цвета цефеид [8], полученных по приведенным в одну систему фотоэлектрическим наблюдениям цефеид [7]. Из кривых были выброшены те, которые не покрыты наблюдениями в значительной части. Таким образом в нашем распоряжении оказались кривые 272 цефеид. Примерно 10% из них имеют некоторый элемент неуверенности из-за различий в данных отдельных наблюдателей или недостаточного количества наблюдений. Было исследовано поведение следующих параметров, характеризующих кривых блеска и показателей цвета с изменением периода: асимметрия ε , фаза φ и площадь F_a горбов, величина G_a , индекс пульсации p_i .

II. Асимметрия определяется отношением интервала времени между минимумом и максимумом блеска (показателя цвета) к целому периоду пульсации:

$$(1) \quad \varepsilon = \frac{M-m}{P},$$

где P — период изменения блеска, M и m — соответственно моменты максимума и минимума блеска (показателя цвета).

Мы обозначили с ε_V асимметрию кривых блеска V , а с ε_{B-V} и ε_{U-B} — асимметрии кривых показателей цвета $B-V$ и $U-B$. Эти величины мы нанесли относительно логарифма периода (рис. 1, 2, 3). На всех фигурах точками отмечены классические цефеиды; крестиками — цефеиды типа WV_{tr} . Как видно, изменения ε_V , ε_{B-V} и ε_{U-B} с периодом очень похожи друг другу. Таким образом, вообще говоря, кривые изменения блеска и показателей цвета приблизительно одинаковой формы. И на трех графиках наблюдается скачок в изменении асимметрии около $P \approx 9^d$ ($\log P \approx 0,95$). Фиг. 1 ÷ 3 показывают, что до $P \approx 9^d$ кривые блеска и показателей цвета с увеличением периода имеют все более и более быстрое нарастание от минимума до максимума. При $P \approx 9^d$ эти кривые скачком становятся симметричными, после чего асимметрия почти линейно уменьшается (кривые становятся менее и менее симметричными) с $\lg P$. Предполагая существование линейной зависимости

$$(2) \quad \varepsilon = a + b \lg P$$

для периодов в промежутке $0,95 \leq \lg P \leq 1,50$, методом наименьших квадратов по 56, 57 и 44 условных уравнений мы получили следующие эмпирические зависимости:

$$(2a) \quad \varepsilon_V = +1,12 - 0,65 \lg P \\ \pm 0,35 \pm 0,80,$$

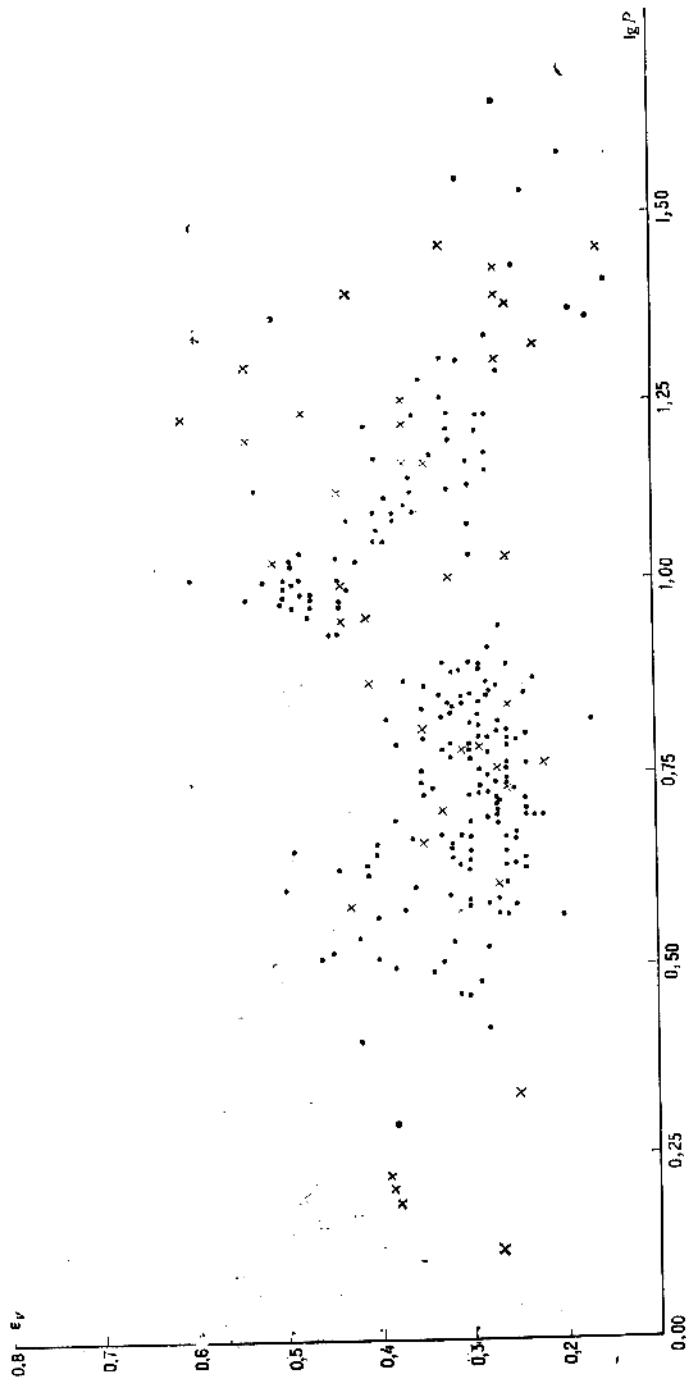


Рис. 1. Асимметрия кривых блеска V в зависимости от $\lg P$

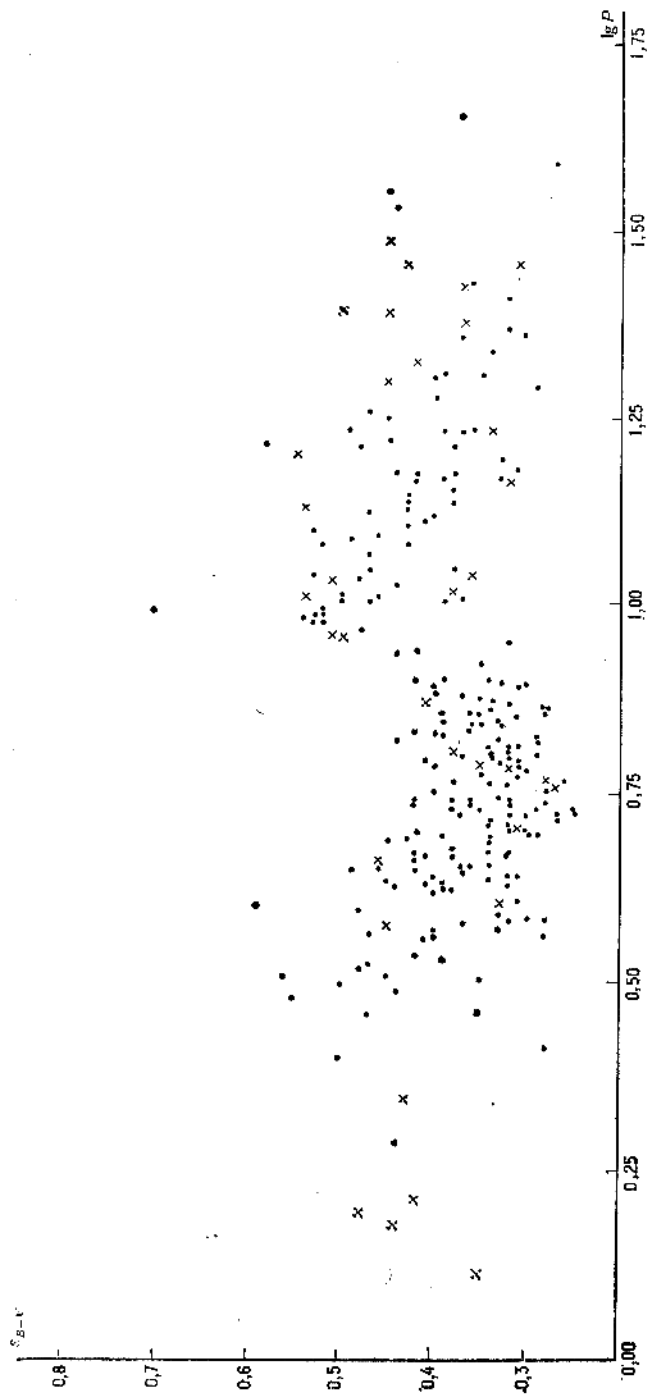


Рис. 2. Асимметрия кривых $B-V$ в зависимости от $\lg P$

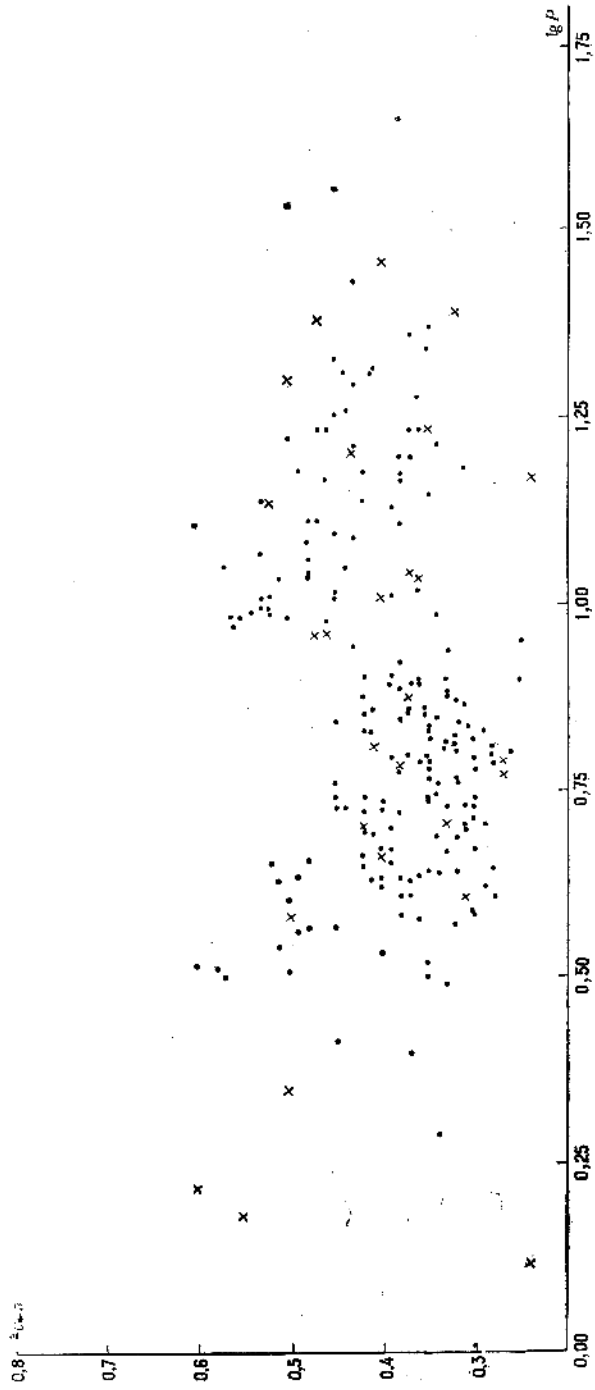


Рис. 3. Асимметрия кривых $U-B$ в зависимости от $\lg P$

$$(26) \quad \begin{aligned} \varepsilon_{B-V} &= +0,95 - 0,45 \lg P \\ &\pm 0,38 \pm 0,33, \end{aligned}$$

$$(2в) \quad \begin{aligned} \varepsilon_{U-B} &= +0,84 - 0,34 \lg P. \\ &\pm 0,42 \pm 0,37 \end{aligned}$$

Эти три прямые пересекаются приблизительно в одну точку ($\varepsilon \approx +0,53$; $\lg P \approx 0,91$), а их наклон по отношению к оси $\lg P$ уменьшается с переходом от V чрез $B-V$ к $U-B$ (рис. 4).

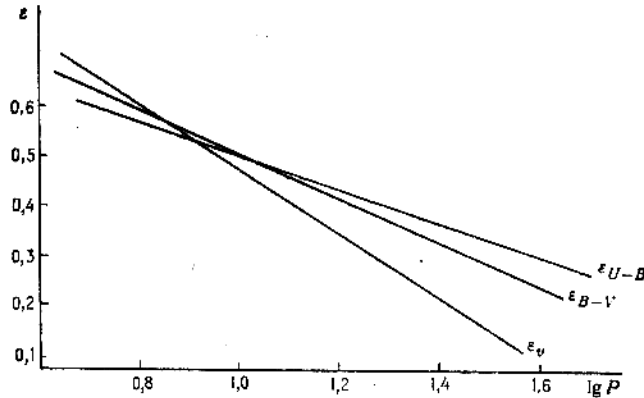


Рис. 4. Зависимости асимметрии кривых блеска и показателей цвета пересекаются приблизительно в одну точку

Это показывает, что симметричность быстрее нарушается с увеличением периода у кривых изменения блеска V и медленнее у кривых изменения показателей цвета $B-V$ и $U-B$. Другими словами, кривые показателей цвета у цефеид симметричнее кривой изменения блеска. Было бы интересно исследовать эту особенность по данным многоцветной фотометрии.

Отдельно мы изучили цефеиды с $P < 9^d$, которые имеют горбы (вторичные максимумы) на нисходящих ветвях кривых блеска и кривых показателей цвета. Мы вычислили асимметрии ε' , заменяя в (1) M с моментом M' этого горба

$$(3) \quad \varepsilon' = \frac{M' - m}{P}.$$

Полученные таким образом ε'_V , ε'_{B-V} , ε'_{U+B} для цефеид с $P < 9^d$ хорошо продолжают зависимость $\varepsilon - \lg P$ при $P > 9^d$ (фиг. 5, 6, 7) и этим подтверждается мнение, что вторичный максимум у цефеид с $P < 9^d$ играет роль главного. Это говорит о существовании по крайней мере двух типов колебания у цефеид [16].

Мы сравнили полученные результаты для галактических цефеид с поведением цефеид ММО на диаграмме $\varepsilon_V - \lg P$ (фиг. 8). Для этого мы использовали фотоэлектрические кривые блеска 64 цефеид [17]. Прежде всего видно, что перерыв у хода зависимости ε_V с $\lg P$ не так ярко выражен, как у галактических цефеид.

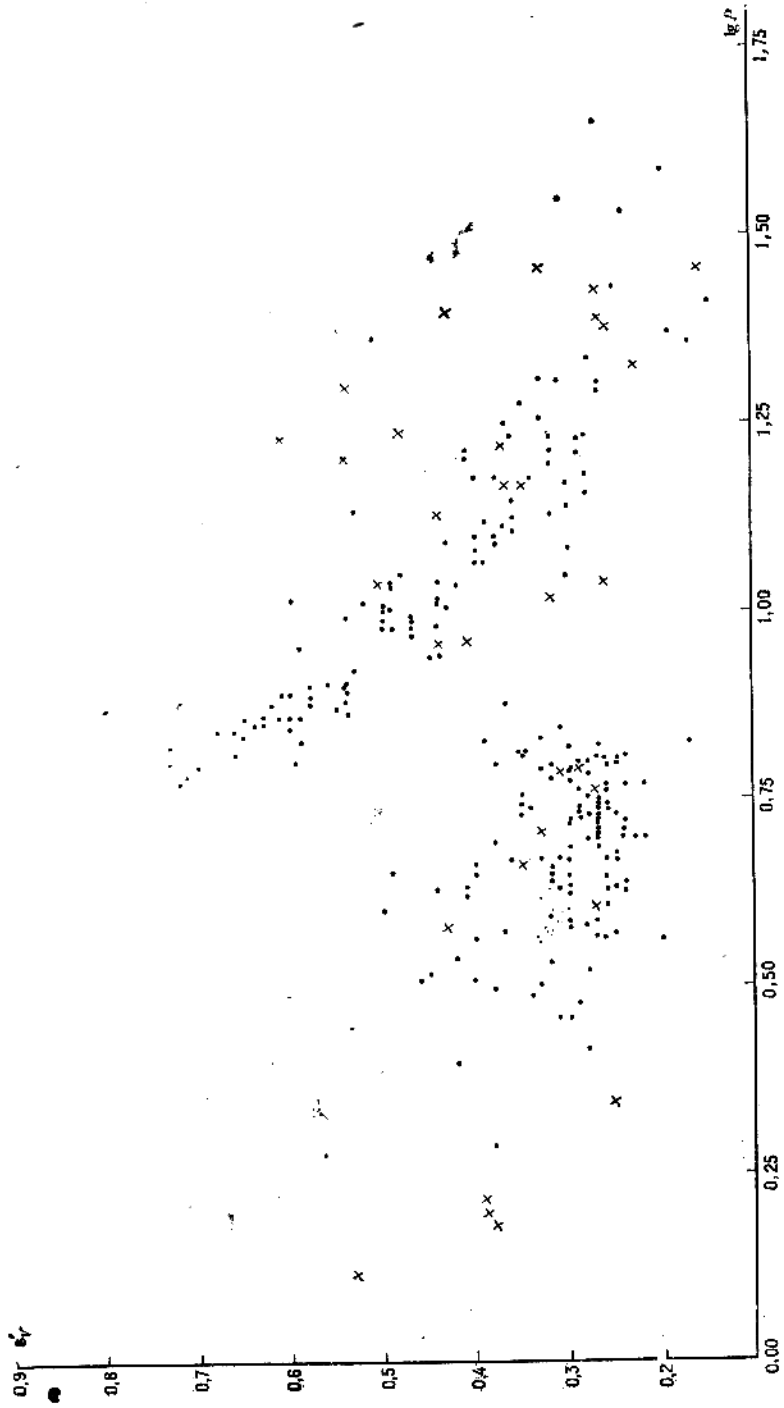


Рис. 5. Асимметрия ϵ' в зависимости от $\lg P$.

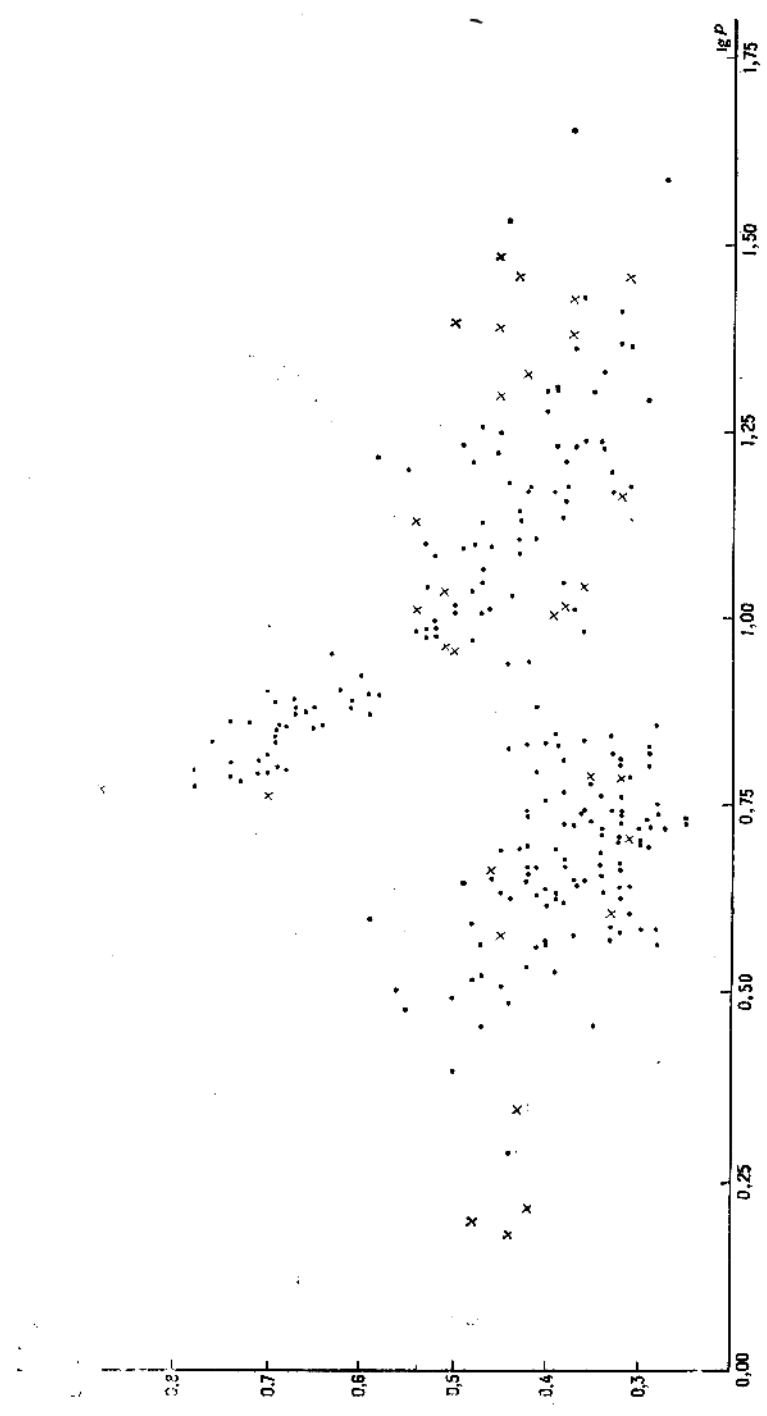


Рис. 6. Асимметрия ϵ_{B-V}^I в зависимости от $\lg P$

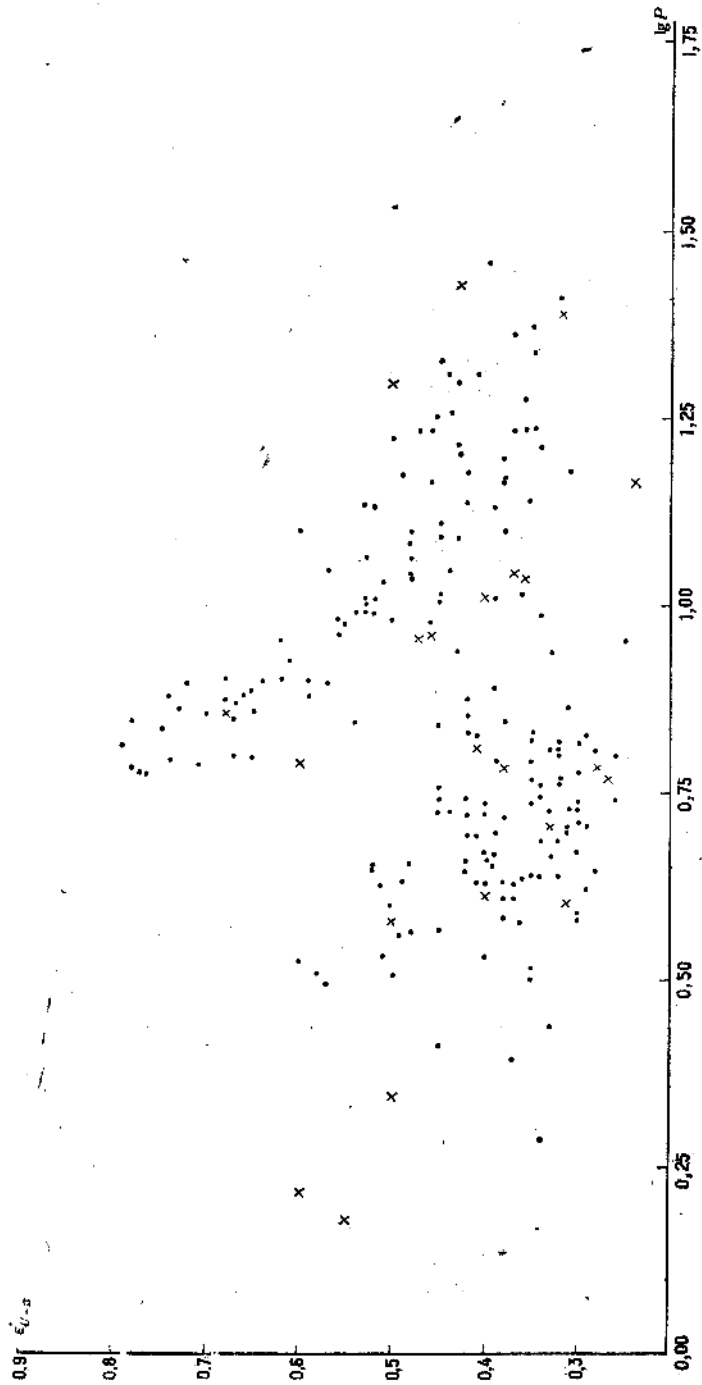


Рис. 7. Асимметрия ϵ_{U-s}^I в зависимости от $\lg P$

Чтобы сравнить поведение амплитуды изменения блеска с $\lg P$ для галактических и для цефеид ММО по данным из [17], мы построили диаграмму $A_V - \lg P$ для цефеид ММО (рис. 9). Несмотря на то, что наблюдается большая дисперсия точек, минимум A_V наблюдается при $P \approx 8^d$, тогда как у галактических цефеид он при $P \approx 9^d$ [19].

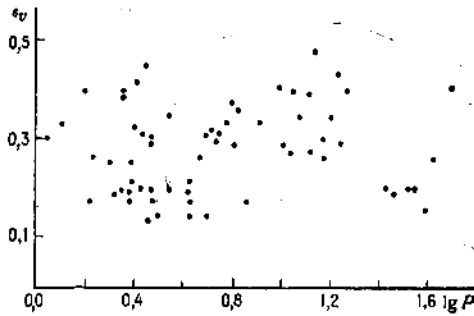


Рис. 8. Асимметрия кривых блеска цефеид ММО в зависимости от $\lg P$

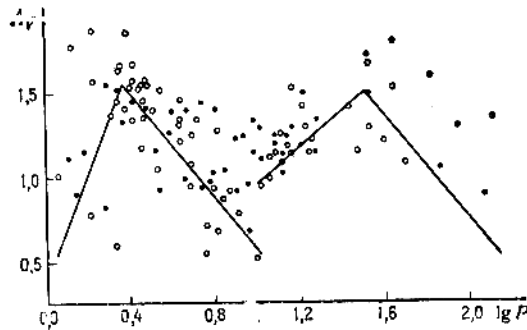


Рис. 9. Амплитуда кривых блеска цефеид ММО в зависимости от $\lg P$

Сопоставление этих результатов с обстоятельством, что пространственное распределение цефеид в нашей Галактике и в ММО различаются [18], дает основание думать, что вероятно физические различия между этими объектами в двух звездных системах имеют более глубокий характер.

Очень возможно, однако, что причиной полученных результатов являются меньшее число и менее точный фотометрический материал для ММО.

III. Параметр G_a является свободным членом фурьерового развития

$$(4) \quad G_a = \frac{1}{P} \int_0^P f(x) dx.$$

На практике этот параметр мы получали как среднюю стоимость ординат точек, по которым построена кривая блеска (показатель цвета), приводя их к минимуму и принимали условно, что каждая рассмотренная амплитуда имела стоимость 10. Были построены диаграммы $G_{aV} - \lg P$,

$G_{a_{B-V}} - \lg P$ и $G_{a_{U-B}} - \lg P$, приведенные на фиг. 10, 11 и 12. Эти диаграммы имеют один и тот же характер (дисперсия точек в последней диаграмме значительна). И на этих диаграммах хорошо замечается перерыв при $P \approx 9^d$. Для периодов $P < 9^d$ ход G_{a_V} и $G_{a_{B-V}}$ с $\lg P$ сравнительно хорошо выражается линейными зависимостями. Для этих зависимостей методом наименьших квадратов было получено

$$\begin{aligned}
 5a) \quad G_{a_V} &= +2,8 + 2,3 \lg P \\
 &\pm 1,7 \pm 2,3, \\
 G_{a_{B-V}} &= +2,5 + 2,0 \lg P. \\
 &\pm 1,7 \pm 2,3
 \end{aligned}$$

Первое из этих уравнений получено по 131, а второе — по 139 условных уравнений.

При периодах $P > 9^d$ все три диаграммы показывают значительно более слабую связь между G_a и P .

IV. Даже самое общее рассматривание кривых блеска и показателей цвета показывает следующее: вторичный максимум нисходящей ветви кривых появляется при наименьшем периоде примерно 6^d (для MW Cyg $P = 5^d, 955$); для периодов около $P = 9^d, 5$ встречаются цефеиды с двойными максимумами; после $P \approx 11^d$ горбы перескакивают главный максимум и наблюдаются на восходящей части кривых блеска и показателей цвета; при $P = 21^d, 85$ (MW Sgr) вторичные максимумы исчезают.

Проводя плавную кривую от главного максимума к минимуму, находим разницу в ординатах между полученным таким образом основанием горба и его точек. Фаза максимальной разницы отвечает фазе φ вторичного максимума, φ отсчитывается по отношению к фазе главного максимума кривой, для которого принимаем $\varphi = 0,0$. На фиг. 13, 14 и 15 даны диаграммы $\varphi_V - \lg P$, $\varphi_{B-V} - \lg P$ и $\varphi_{U-B} - \lg P$.

Интересно отметить, что звезды VX Cyg, RZ Vel, RY Sco, WZ Sgr обособляются в группу и на трех диаграммах, отделяясь от остальных (они имеют большие положительные φ при больших периодах).

Отметим, что φ при $P > 10^d$ ($\varphi < 0,0$) более неуверенные по сравнению с $\varphi > 0,0$ ($P < 10^d$), потому что горбы на восходящих ветвях кривых вообще определяются сравнительно менее точно.

Нам кажется очень интересным то, что в некотором интервале периодов вокруг $P = 9^d - 10^d$ наблюдаются как цефеиды, у которых вторичный горб находится на нисходящей ветви кривой блеска, так и цефеиды, у которых он находится на восходящей ветви. Это говорит о некотором перемешивании двух групп цефеид или о некотором взаимопроникновении их свойств [16]. Притом наблюдается небольшое число цефеид с большими периодами, у которых вторичный горб наблюдается на нисходящей ветви кривой блеска или показателей цвета.

Сопоставление площадей, ограниченных горбами, с $\lg P$ не дало определенных результатов.

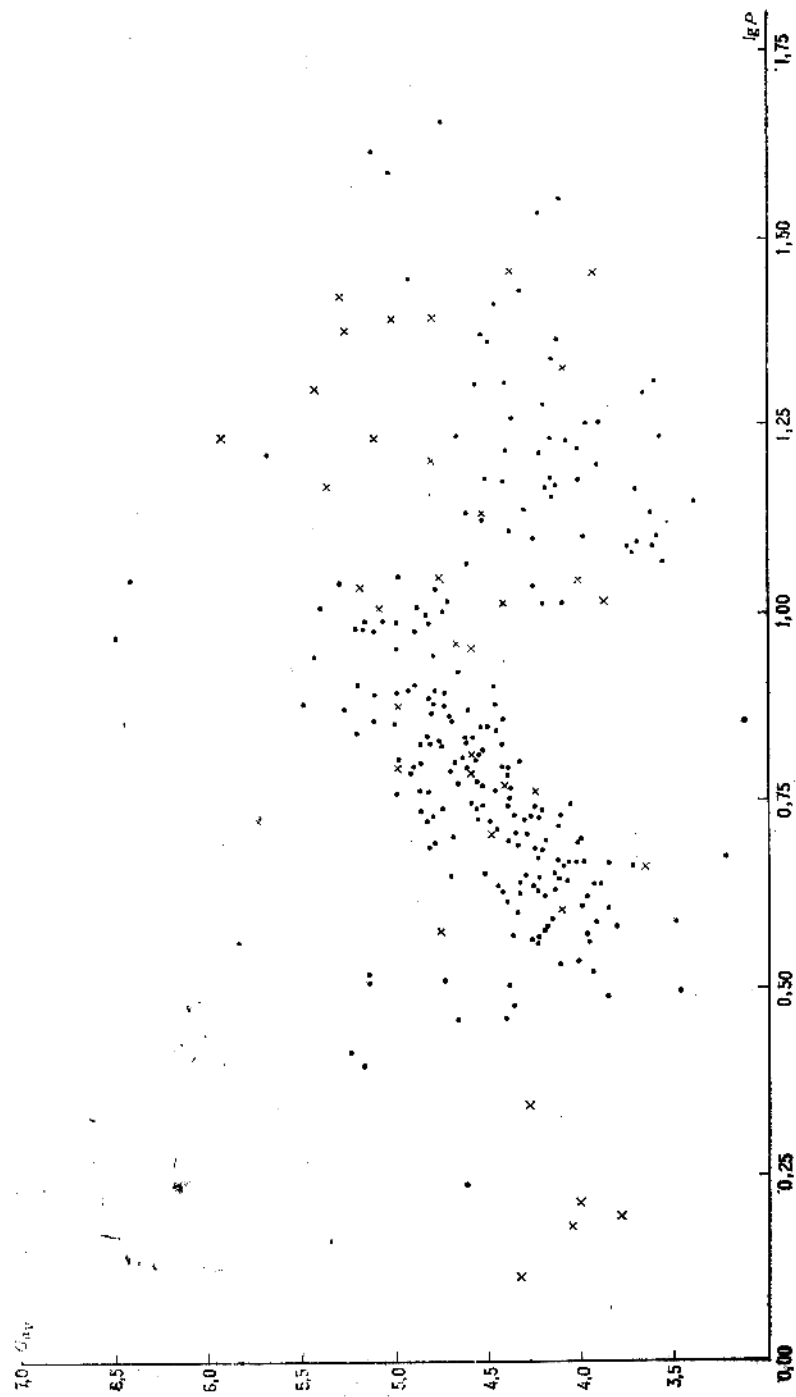


Рис. 10. Зависимость G_{ay} от $lg P$

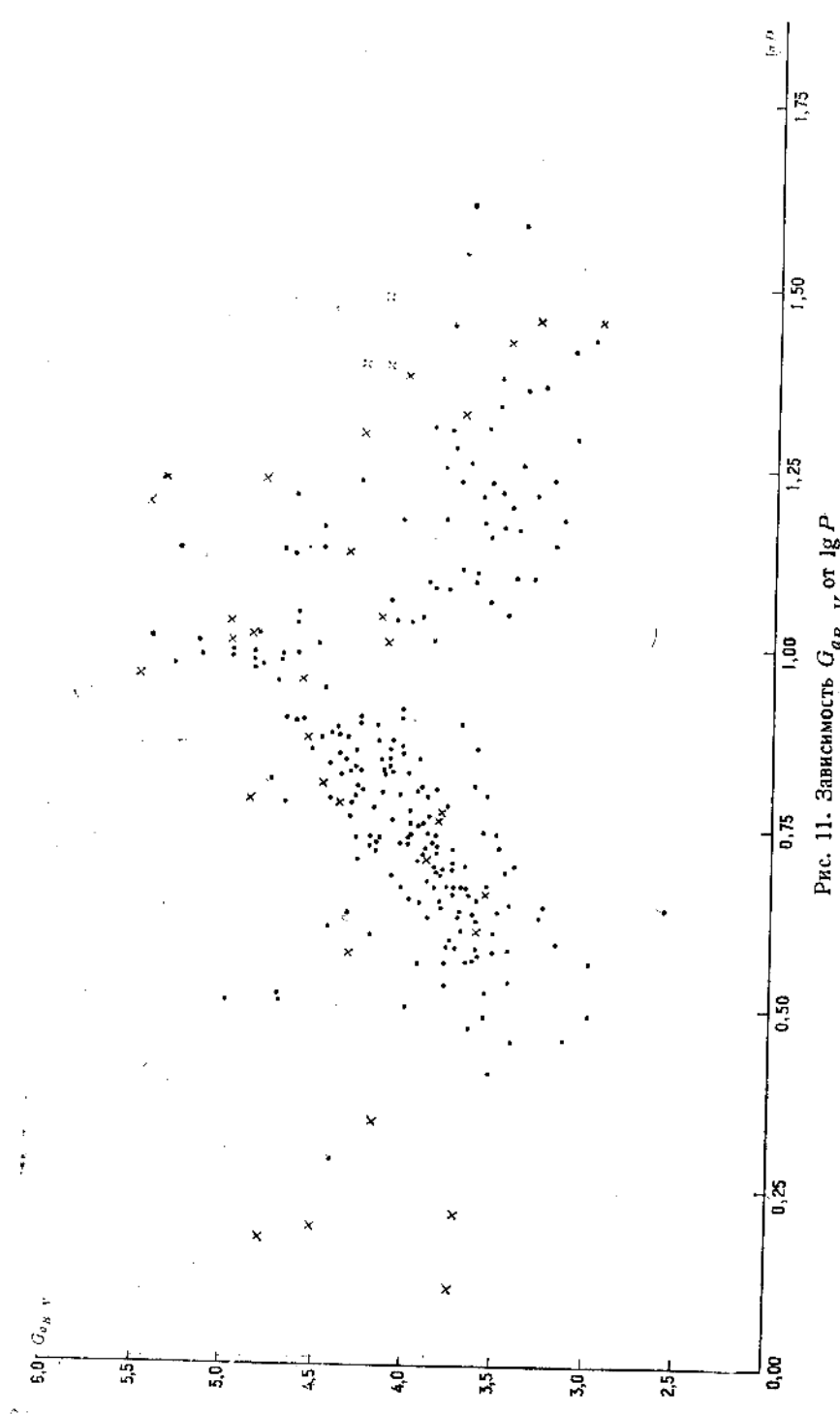


Рис. 11. Зависимость $G_{aB-\gamma}$ от $lg P$

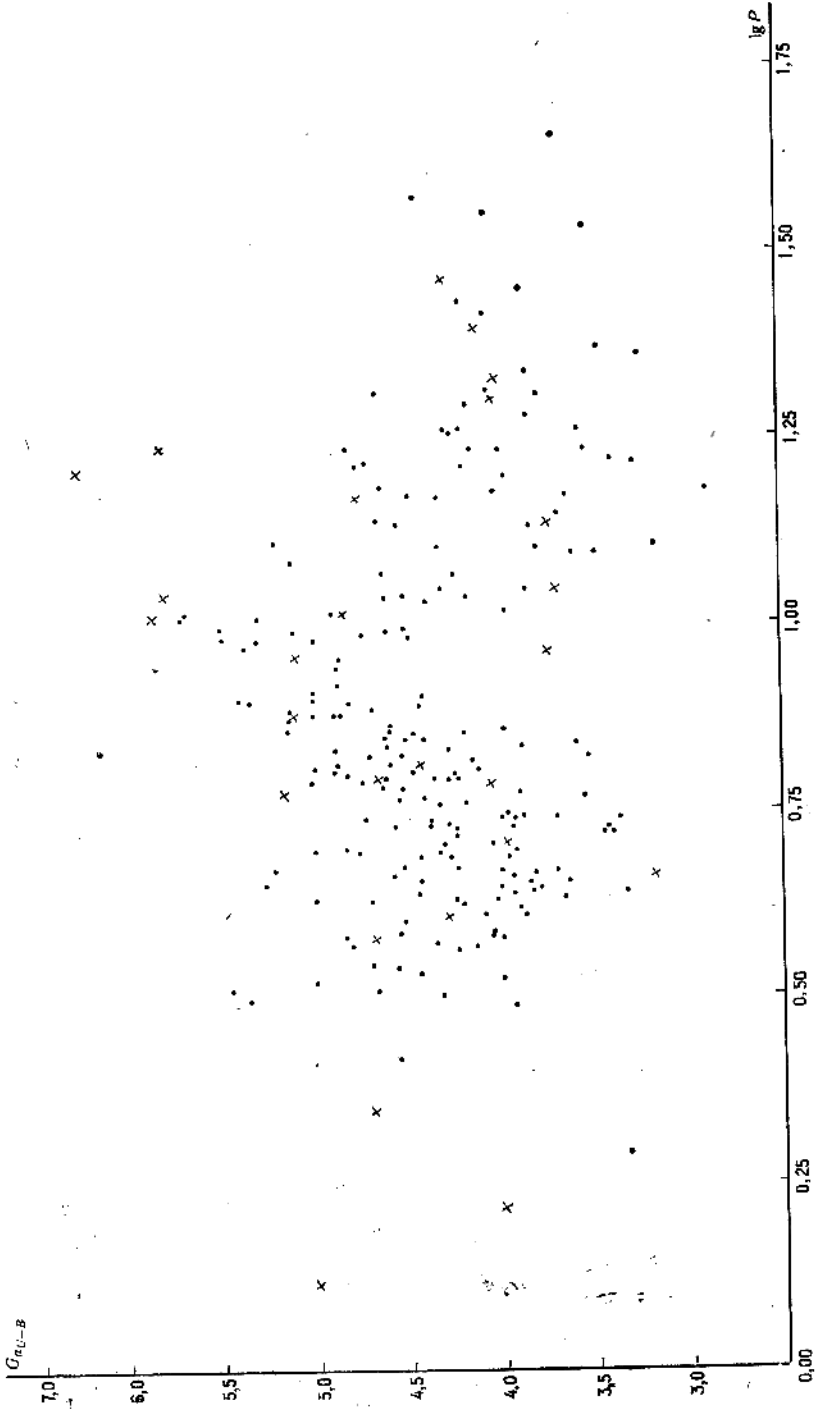


Рис. 12. Зависимость G_{AU-B} от $lg P$

V. Индекс пульсации pi [20] характеризует время, за которое данная цефеида находится в устойчивом режиме увеличения блеска (прямолинейная часть восходящей ветви кривой блеска):

$$(6) \quad pi = \frac{P}{M - t_m}$$

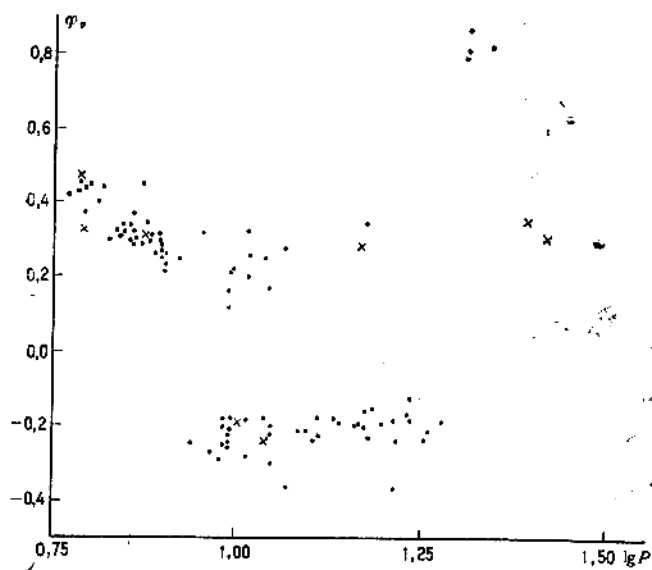


Рис. 13. Зависимость ϕ_V от $\lg P$

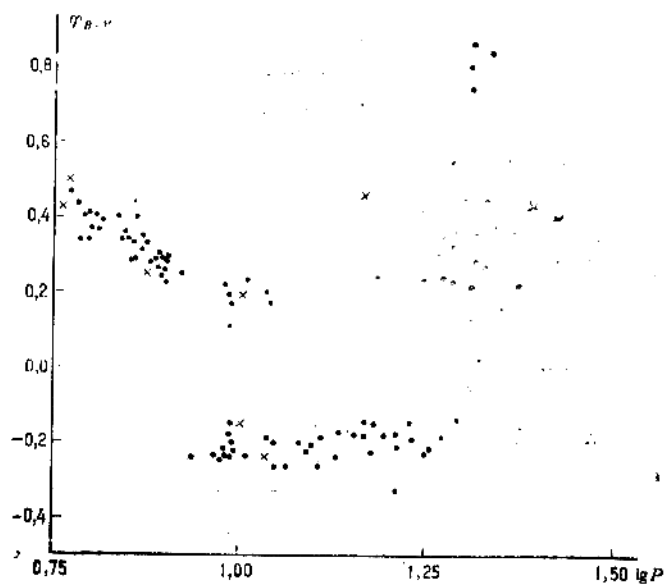


Рис. 14. Зависимость ϕ_{B-V} от $\lg P$

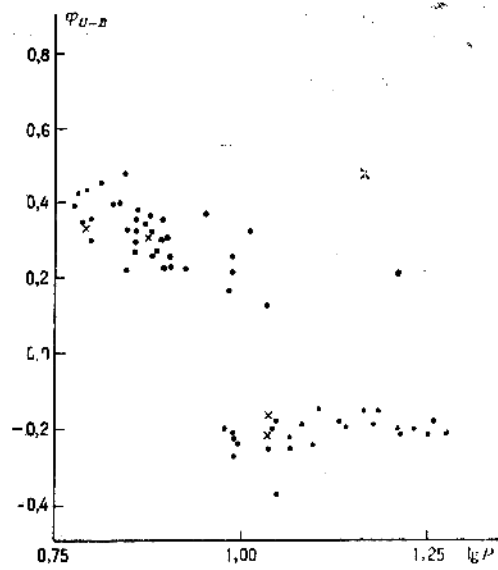


Рис. 15. Зависимость φ_{U-B} от $\lg P$

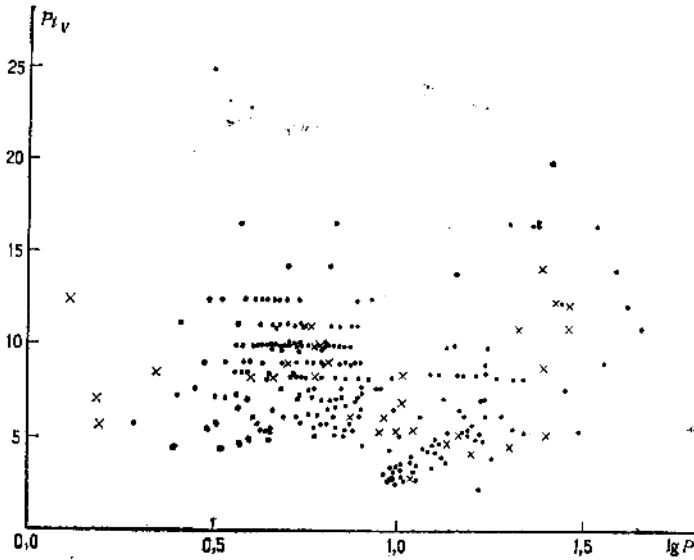


Рис. 16. Индекс пульсации pI_x в зависимости от $\lg P$

t'_m — момент, в котором после минимума блеска звездная величина достигла значение на $0,2 A$ меньше минимального, а t'_M — момент, в котором она достигла значение $0,8 A$ меньше минимального (A — амплитуда изменения блеска). Как видно, минимальные стоимости наблюдаются около $\lg P = 1,0$ (фиг. 16, 17, 18).

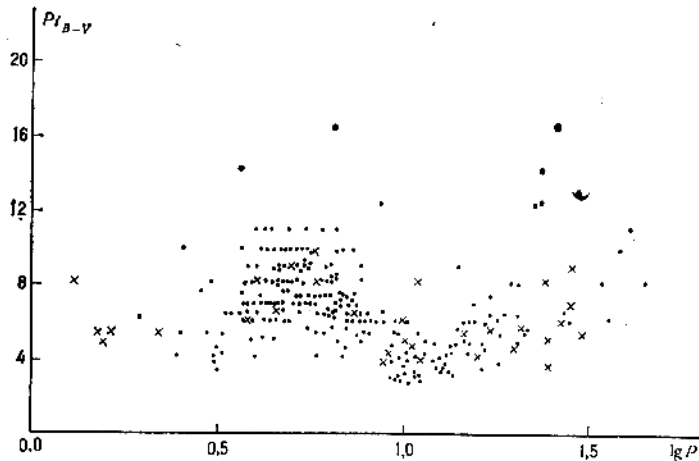


Рис. 17. Индекс пульсации p_{B-V} в зависимости от $\lg P$

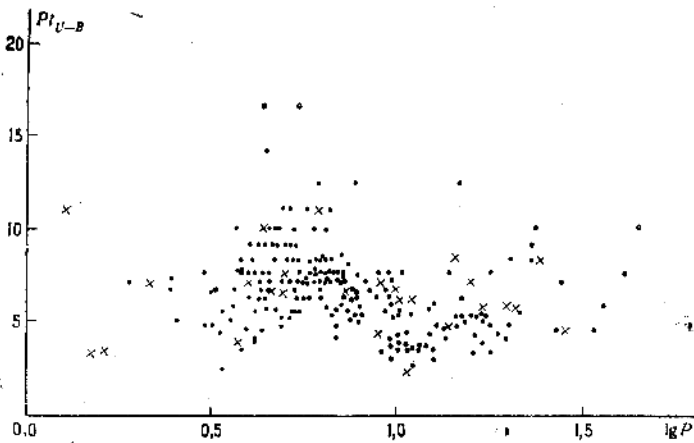


Рис. 18. Индекс пульсации p_{U-B} в зависимости от $\lg P$

ЛИТЕРАТУРА

1. Ludendorff H., Astr. Nach. **209**, 217, 1919.
Ludendorff H., Sitzunber. d. Preuss. Akad. d. Wiss., 1929.
2. Hertzsprung E., BAN, **3**, 115 (96), 1926.
3. Hoffmeister C., Astr. Nach. **225**, 201, 1925.
4. Lundmark K., Zeit. Astroph., **3**, 313, Lund. Medd. Ser. I, N° 128, 1930.
Lundmark K., Lund. Cirk., **7**, 1932.
Lundmark K., V. I. S., **68**, 369, 1933.
5. Parenago P., В. Кукаркин, Zeit. Astroph., **11** 337—335, 1936.
6. Mitchell R. I., Iriarte B., P. Steinmetz, H. L. Johnson, Tonancintlay
Takubaia, Bull. **3**, N° 24, 1964.
7. Николов Н. С., Диссертация, ГАИШ, Москва, 1965.
8. Николов Н. С., Каталог кривых блеска и показателей цвета цефеид в системе U, B, V , Изд. на БАН, София, 1968.

9. Iben I. J., Annual review of astr. and astroph., **5**, 571, 1967.
10. Sandage A. R., Astroph. J., **27**, 513, 1958.
11. Ефремов Ю. Н., И. М. Копылов, Изв. КрАО, **36**, 240, 1967.
12. Ефремов Ю. Н., Переменные звезды, **14**, № 3 (111), 139, 1962.
13. Hoffmeister E., R. Kippenhahn, A. Weigert, Zeit. Astroph., **60**, 57, 1964.
14. Kippenhahn R., H. C. Thomas, A. Weigert, Zeit. Astroph., **61**, 241, 1965;
64, 373, 1966.
15. Iben I. J., Astroph. J., **140**, 1631, 1964; **143**, 483, 1966.
16. Якимова Н. Н., Астрон. циркуляр, № 472, 1968.
17. Agr H. C., Astron. J., **65**, 404, 1960.
18. Кукаркин Б. В., Исследование строения и развития звездных систем..., ГИТТЛ,
Москва, 1949.
19. Николов Н. С., А. С. Николов, Изв. на Секцията по астрон. при БАН, 1968.
20. Sharp H., V. McKibben Nail, Proc. Nat. Acad. Sci., **26**, 105, 1940.

Получена на 4. XII. 1968 г.

ON THE SHAPES OF THE LIGHT AND COLOUR CURVES OF THE CEPHEIDS IN THE U, B, V SYSTEM

N. Nikolov, R. Russev and S. Milcheva

(Summary)

The light V and colour $B - V$ and $U - B$ curves of the cepheids, obtained by photoelectrical observations of about 300 galactic cepheids collected and reduced in the U, B, V system [7] are used.

The behaviour of the parameters: asymmetry ϵ , phase φ and area F_a of the secondary maximum, index of pulsation pi and the value G_a , characterizing the light and colour curves, is investigated and their correlations with the logarithm of the period are studied. All the parameters show a break at $P \approx 9^d - 10^d$ ($\lg P \approx 0.95$), expressed by a change in the course of the considered parameters with the change of the period. The shape and change with the period of the light and colour curves, as they are characterized by these parameters, are approximately the same.

The results obtained in general confirm the results of P. P. Parenago and B. V. Kukarkin [5].

A comparison of the dependences $\epsilon_V - \lg P$ and $A_V - \lg P$ for the galactic cepheids and the cepheids of SMC after [17] is made.