

Переменные звезды 20, 219–241, 1976.
Variable Stars 20, 219–241, 1976.

Поиск периодической составляющей в оптической переменности рентгеновских источников Cyg X-2 и Sco X-1

М.М. Баско, В.П. Горанский, В.М. Лютый, Л.Л. Рузан,
 Р.А. Сюняев, С.Ю. Шугаров

В настоящей работе даны результаты математической обработки фотоэлектрических и фотографических наблюдений переменных звезд-источников рентгеновского излучения V 1341 Cyg (Cyg X-2) и V 818 Sco (Sco X-1). Статистический спектральный анализ проводился с помощью ЭВМ БЭСМ-6 с применением алгоритмов Курочкина и Юркевича. В обработке использованы 335 фотоэлектрических наблюдений в системе UVV, полученных В.М. Лютым на Крымской станции ГАИШ, и 613 фотографических наблюдений (511 в В и 102 в V), полученных на Крымской станции ГАИШ и в Москве С.Ю. Шугаровым и В.П. Горанским, рентгеновского источника Cyg X-2 (V 1341 Cyg) за июль 1974 – ноябрь 1975 г., а также 86 фотоэлектрических наблюдений UVV рентгеновского источника Sco X-1 (V 818 Sco), полученных В.М. Лютым с июня 1972 г. по август 1975 г.

Переменная звезда V 1341 Cyg (Cyg X-2) меняет блеск хаотически в пределах $14^m.6 - 15^m.7$ В, $B - V \approx +0.43$, $U - B \approx -0.2$. Статистический анализ наблюдений до середины апреля 1975 года дает набор суточно-сопряженных значений периода, наиболее достоверные значения которых $P_1 = 5^d.92 \pm 0^d.05$, $P_2 = 0^d.8528 \pm 0^d.001$, $P_3 = 1^d.2034 \pm 0^d.002$. В середине апреля 1975 года произошли некоторые изменения в фотометрическом поведении звезды, и привлечение более поздних наблюдений уменьшает достоверность этих значений периода.

В статье приводятся фотографические наблюдения переменной звезды V 1341 Cyg (Cyg X-2).

V 818 Sco – неправильная переменная звезда, отождествляемая с рентгеновским источником Sco X-1. $B - V = +0^m.15$; $U - B = -0^m.90$. Статистический спектральный анализ дает три приблизительно равнодостоверных суточно-сопряженных значения периода: $P_1 = 3^d.74 \pm 0^d.005$, $P_2 = 1^d.1245 \pm 0^d.0005$, $P_3 = 0^d.7872 \pm 0^d.0003$.

И хотя достоверность этих периодов невелика, тот факт, что P_1 и P_3 в точности совпадают с наилучшими значениями периодов, найденными Готтлиб и др. (1975) по независимому ряду наблюдений, лишнее свидетельствует в пользу двойственности этого объекта.

Трудности в определении периодичности в изменении блеска этих двух переменных звезд обусловлены наличием нерегулярной составляющей с большой амплитудой в изменении блеска рентгеновских источников Cyg X-2 и Sco X-1.

Search for the Regular Component in the Optical Variability of the X-Ray Sources Cyg X-2 and Sco X-1

by M.M. Basko, V.P. Goranskij, V.M. Lyuty, L.L. Ruzan,
R.A. Sunyaev, S.Yu. Shugarov

The results of the statistic spectral analysis of photoelectric and photographic observations of optical counterparts of X-ray sources V 1341 Cyg (Cyg X-2) and V 818 Sco (Sco X-1) are given in this paper. The computer program for BESM-6 is based on two independent algorithms of Jurkevich and Kurochkin (the latter one is similar to that used by Gottlieb et al.). 335 photoelectric UBV-observations and 613 photographic observations (511 in B, and 102 in V-system) of variable star V 1341 Cyg (Cyg X-2) carried out in July 1974 – November 1975 and 86 photoelectric UBV- observations of variable star V 818 Sco (Sco X-1) carried out in June 1972 – August 1975 were explored by computations.

V 1341 Cyg (Cyg X-2) varies irregularly within the limits of B-magnitude 14.6 – 15.7. The mean colours are: $B - V = +0.43$, $U - B = -0.2$. Figure 7a,б presents the dependence of the scatter in light curve $D(P^{-1})$ on the reverse period in units of day^{-1} . The time intervals of observations utilized are given on Figures. The results of application of Kurochkin's algorithm are given on Figures 8a,б. This plot shows the dependence of the half-amplitude of the best sinusoidal curve $A(P^{-1})$ approximating the observed functions $m(t_i)$ on the reverse period. The results of both algorithms are in good agreement.

These plots corresponding to the time interval JD 2442247–42570 show strong peaks at the value $P_1 = 5^{\text{d}}.92 \pm 0.05$ and its aliases $P_2 = 0^{\text{d}}.8528 \pm 0.001$, $P_3 = 1^{\text{d}}.2034 \pm 0.002$ and others given in Table 2. In the middle of April 1975 the photometric behaviour of the star changed. The star became weaker by $0^{\text{m}}.11$ in B-light. The histogram of B-observations changed abruptly (Fig. 9). The more wide span of observations JD 2442247–42684 gives much less confidence level (and amplitude) for the same groups of periods. Thus, on the basis of photometric observations available for Cyg X-2 in November 1975 we cannot prove its binary nature and point out its real binary period. But the check of our results by further UBV-observations and spectral observations of the radial velocities is desirable.

Photographic observations are given in Table 3.

The X-ray star V 818 Sco (Sco X-1) is an irregular variable. Its mean colours are: $B - V = +0^{\text{m}}.15$, $U - B = -0^{\text{m}}.90$. The statistic analysis of observations gives three values of periods of the equal reliability: $P_1 = 3^{\text{d}}.74 \pm 0.005$; $P_2 = 1^{\text{d}}.1245 \pm 0.0005$ and $P_3 = 0^{\text{d}}.7872 \pm 0.0003$. Although the reliability of these periods is small, the exact coincidence of P_1 and P_3 with the periods found by Gottlieb et al. (1975) by an independent ray of observations is best evidence of the binary nature of this X-ray source.

The most difficulty of problem of the determination of periods of variable stars V 1341 Cyg and V 818 Sco is due to large amplitude irregular component in the light variability.

В настоящее время известно более 100 компактных рентгеновских источников, 8 из них входят в состав тесных двойных систем. Именно эти 8 рентгеновских звезд стали главным источником знаний об этих объектах, о природе рентгеновского излучения. Основными свидетельствами принадлежности рентгеновского источника к тесной двойной системе являются наличие периодической составляющей в оптическом излучении двойной системы или наличие периодической составляющей в лучевых скоростях. Блеск двойной системы с рентгеновским источником может меняться вследствие орбитального движения в системе по нескольким причинам. Это эллипсоидальность формы одной из звезд в системе, обусловленная гравитационным полем рентгеновской звезды, повышенная яркость части обычной звезды, обращенной к рентгеновской звезде — горячего пятна (эффект отражения). В первом случае орбитальный период равен двойному фотометрическому, во втором — два периода, орбитальный и фотометрический, совпадают. Определение фотометрического периода, таким образом, дает очень ценную информацию о природе рентгеновского источника и его массе.

Однако до последнего времени у переменных звезд V 1341 Cyg — рентгеновского источника Cyg X-2 и у V 818 Sco — рентгеновского источника Sco X-1 не удавалось выделить регулярную составляющую блеска на фоне сильной (с амплитудой около 1^m) нерегулярной переменности, хотя эти рентгеновские источники отождествлены с оптическими объектами уже около 10 лет назад. Статистический анализ блеска в этом случае требует больших рядов высококачественных наблюдений. На Крымской станции ГАИШ и в Москве с июля 1974 г. по ноябрь 1975 г. получено 335 фотоэлектрических наблюдений в системе UBV, 613 фотографических наблюдений (511 в В и 102 в V) переменной звезды V 1341 Cyg (Cyg X-2) и 86 фотоэлектрических наблюдений в системе UBV переменной звезды V 818 Sco (Sco X-1). Результаты статистического спектрального анализа этих наблюдений (поиска периодической составляющей) представлены в данной работе.

1. Переменная звезда V 1341 Cyg — рентгеновский источник Cyg X-2.

Фотоэлектрические наблюдения V 1341 Cyg = Cyg X-2 проводились на Крымской станции ГАИШ В.М. Лютым. Использовался в основном 60-см телескоп и электрофотометр со счетом фотонов. Иногда наблюдения проводились на 125-см рефлекторе. Полный список наблюдений дается в статье Лютого и Сюняева (1976).

Наблюдения проводились дифференциальным способом по схеме "звезда сравнения — переменная звезда — звезда сравнения" и т.д. Основной звездой сравнения служила звезда № 2 (Табл. 1), величина и показатели цвета которой определены привязкой к локальным стандартам в поле Cyg X-2 — BD +36° 4674, BD +37° 4409 и BD+39° 4667 (Катей и Хайес, 1968). Кроме того, для калибровки фотографической фотометрии определены величины и показатели цвета еще 10 звезд до 16^m в окрестностях Cyg X-2. Эти величины и показатели цвета приводятся в табл. 1. Средняя ошибка одного измерения составляет $\pm 0^m.02 - 0^m.03$ для В и V

и $\pm 0^m.05 - 0^m.08$ для U . Такая же ошибка и у одного измерения переменной.

Фотографические наблюдения производились с августа 1974 года по ноябрь 1975 года на менисковом астрографе АЗТ-5 и 40-см астрографе Крымской станции ГАИШ, а также на 70-см рефлекторе ГАИШ в Москве в системе В (фильтры BC-8 или GG-13, эмульсия ZU-2, А-500) и V (фильтр ЖС-17, эмульсия Kodak 103aD, 103aG; А-600). С целью получения наиболее полного ряда наблюдений фотографирование производилось при различных условиях видимости (в ясные ночи с различной прозрачностью атмосферы, в прорывы между облаками, на низких высотах над горизонтом). Среднее время экспозиции на АЗТ-5 — 8–10 минут, на АЗТ-2 и 40-см астрографе — 20÷30 минут. Чтобы избежать систематических ошибок, вызываемых различными условиями наблюдений и применением различных эмульсий, в качестве звезд стандарта в окрестностях V 1341 Cyg были подобраны звезды, несущественно отличающиеся по цвету от исследуемой звезды. Это звезды 4, 5, 6, 7, 8, 9 из таблицы 1.

Все фотопластинки были измерены на ирисовом фотометре ГАИШ. Средняя ошибка одного измерения составляет $\pm 0^m.10 - 0^m.15$.

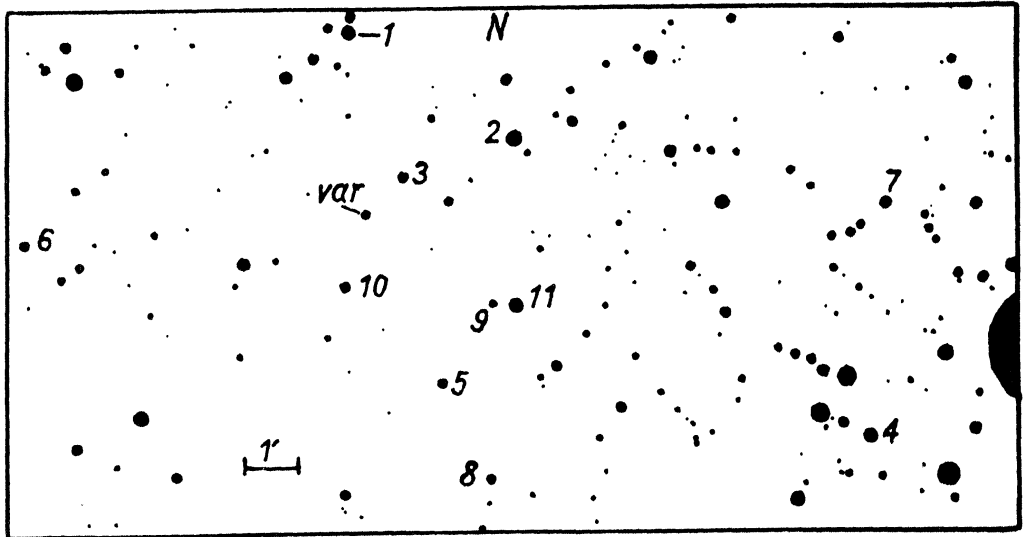


Рис.1. Карта окрестностей V 1341 Cyg (Cyg X-2).

Звезда	V	B	B-V	U-B	n	Таблица 1.
						Примечание
1	12.82	13.75	+0.93	+0.41	4	контр. зв. электрофот.
2	12.99	13.61	+0.62	0.00	5	зв. ср. электрофот.
3	13.49	14.80	+1.31	+0.86	1	фотографич. зв. сравн.
4	13.51	14.19	+0.68	+0.17	2	
5	14.47	15.25	+0.78	+0.05	2	
6	14.57	15.26	+0.69	-0.14	1	
7	13.86	14.71	+0.85	+0.24	1	
8	14.95	15.51	+0.56	0.00	1	
9	15.56	16.14	+0.58	-0.08	2	
10	13.54	14.97	+1.43	+1.18	2	
11	12.09	13.93	+1.84	+1.45	1	

2. Результаты наблюдений V 1341 Cyg (Cyg X-2).

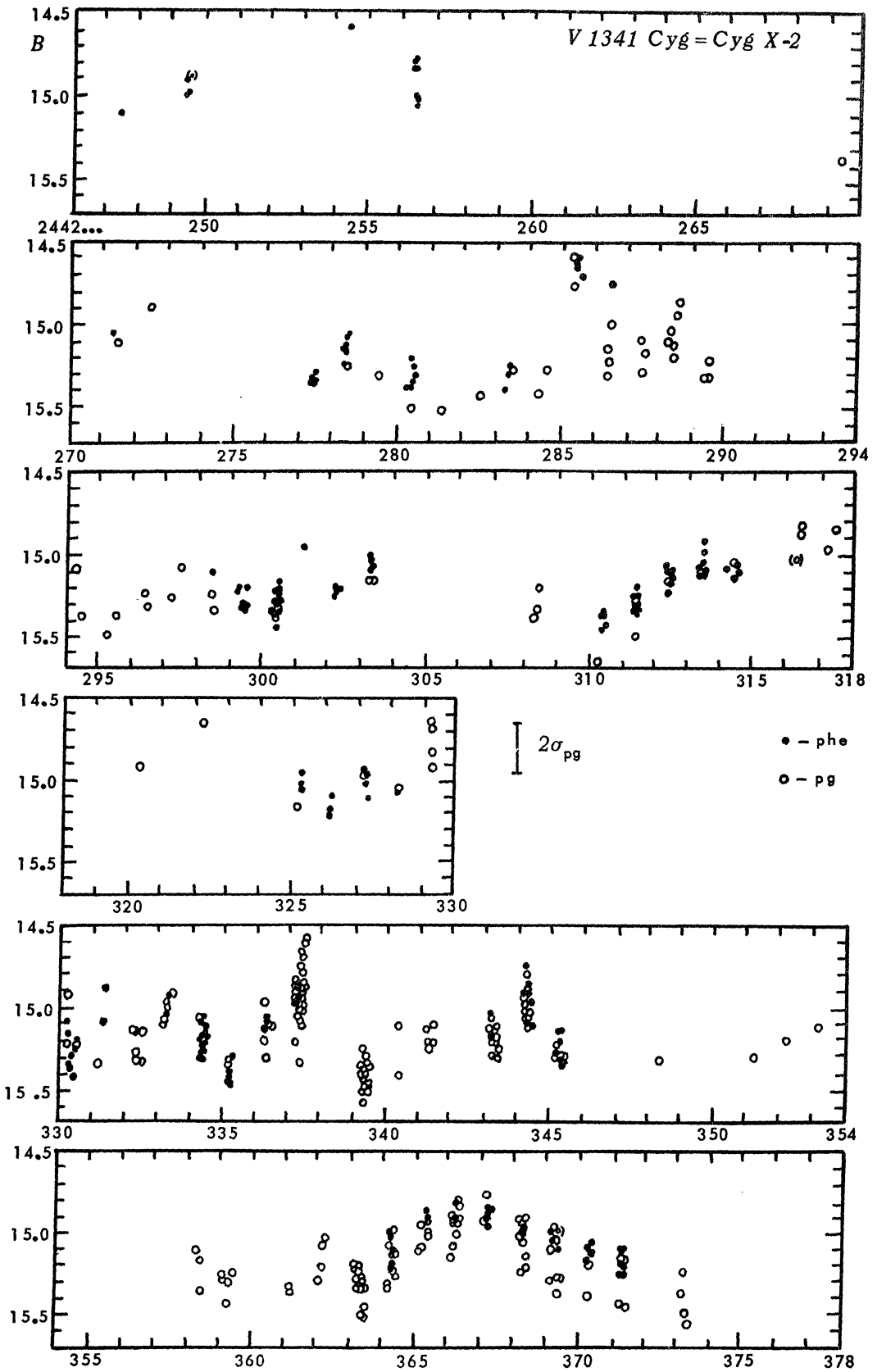
Фотоэлектрические наблюдения показывают, что переменная звезда V 1341 Cyg является неправильной переменной с ультрафиолетовым избытком излучения. Амплитуда переменности блеска в полосе В немного превосходит 1^m (пределы изменения блеска $14^m.6 - 15^m.7$ В). В фильтрах V и U амплитуды переменности блеска составляют соответственно $0^m.8$ (14.1 – 15.0) и $1^m.4$ (14.1 – 15.5). Полная кривая блеска, построенная по фотоэлектрическим (точки) и фотографическим (кружки) наблюдениям представлена на рис. 2. Для V 1341 Cyg характерны как быстрые (несколько часов), так и медленные (волнообразные от 5 до 15 суток) колебания блеска. Фотоэлектрические наблюдения показывают очень быструю хаотическую переменность (около 0.5 минуты) с амплитудой $0^m.1 - 0^m.2$ в полосе U. Величина показателя цвета В–V практически не зависит от блеска звезды (рис. 3) и составляет (в среднем) $+0^m.43$, для показателя цвета U–В характерно небольшое уменьшение при увеличении блеска (рис. 4). На рис. 5 показано перемещение переменной V 1341 Cyg по двухцветной диаграмме. Каждая точка на диаграмме – отдельное фотоэлектрическое наблюдение. Для сравнения на эту же диаграмму нанесены наблюдения других переменных звезд, являющихся рентгеновскими источниками: Sco X-1 = V 818 Sco и Her X-1 = HZ Her.

Наличие сильных до 1^m хаотических колебаний блеска и слабость периодической составляющей можно объяснить в предположении, что существенную часть оптического излучения системы обеспечивает диск и прогретая рентгеновским излучением сторона звезды (Лютый, Сюняев, 1976). Например, при угле наклона орбиты $i \approx 36^\circ$ и равном вкладе всех трех компонент (диска, горячего пятна, непрогретой стороны нормальной звезды) в общую светимость системы полная амплитуда регулярной переменности будет существенно меньше $0^m.2$. Это является следствием малого вклада горячего пятна в общий блеск системы (1/3), малости излучения при небольших углах i и слабого изменения наблюдаемой площади пятна в зависимости от фазы орбитального периода. Нерегулярную быструю переменность блеска естественно связать с переменностью рентгеновского потока, прогревающего внешние области диска и горячее пятно.

Интересно также отметить заметное изменение фотометрического поведения звезды в середине апреля 1975 г. На рис. 6 показаны гистограммы блеска В до JD 244 2520 и после этого момента. Заметно, что средний блеск звезды уменьшился от $15^m.17$ до $15^m.28$, амплитуда изменений блеска уменьшилась.

Поиск периодической составляющей в оптической переменности Cyg X-2 проводился на ЭВМ БЭСМ-6 по методике, описанной в Приложении к данной статье, с помощью двух независимых алгоритмов Юркевича (1971) и Курочкина (1973) по программам, составленным Баско (1976).

Результаты статистического спектрального анализа блеска V 1341 Cyg представлены на рисунках 7 а, б, где дана зависимость дисперсии средней кривой блеска $D(P^{-1})$, параметра Юркевича, от величины



Puc. 2.

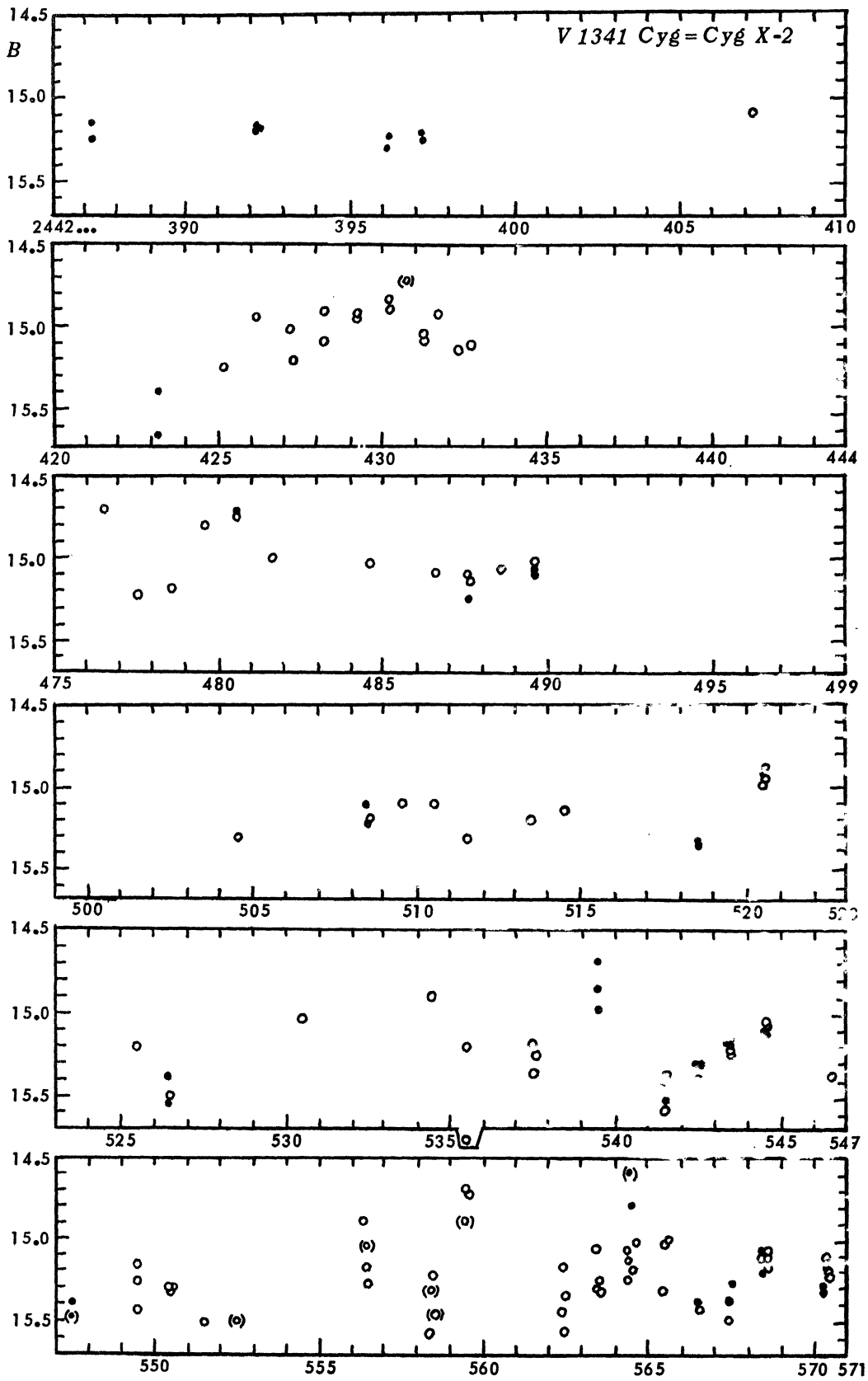


Рис. 2 (продолжение)

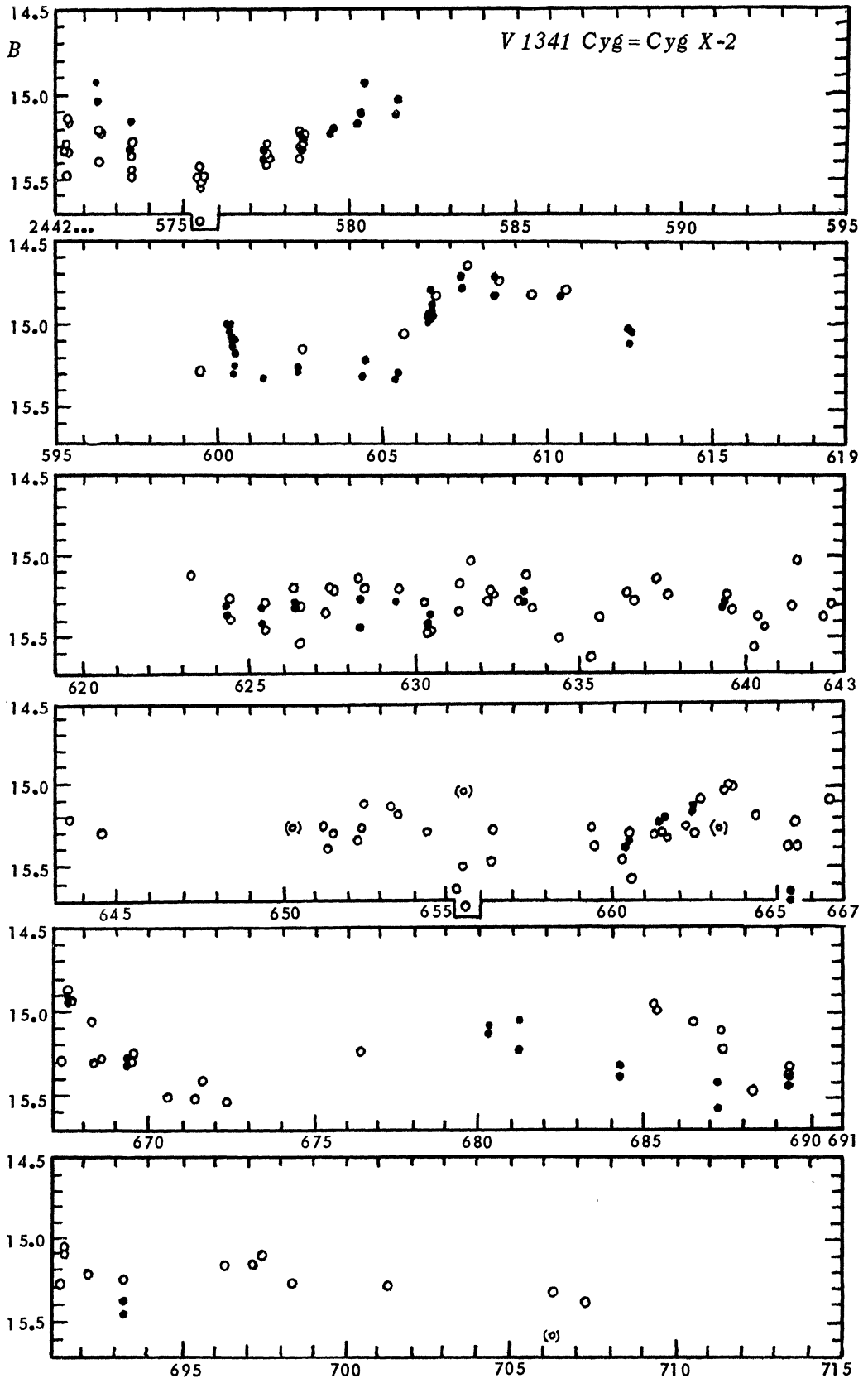


Рис. 2 (продолжение).

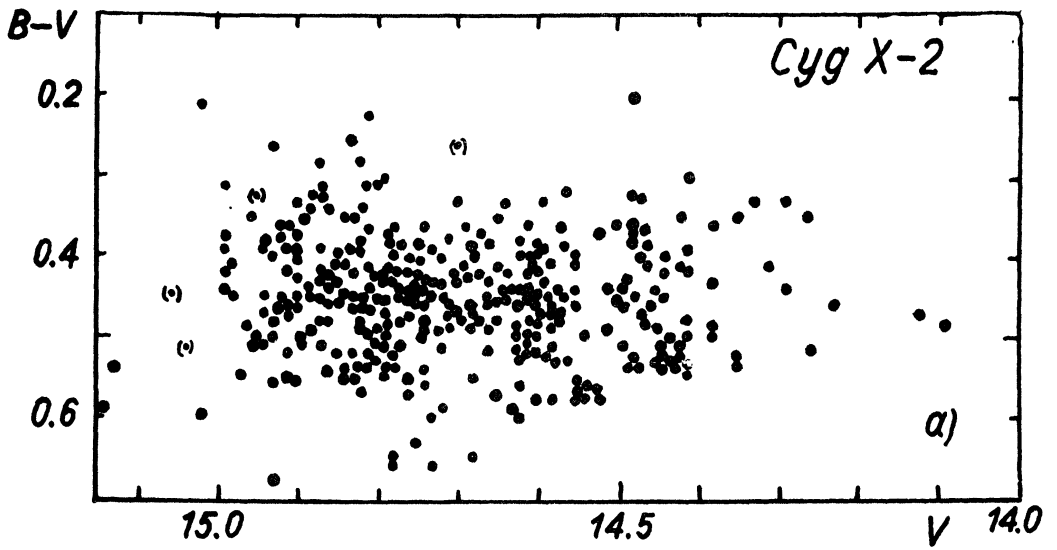


Рис. 3. Зависимость показателя цвета $B-V$ от блеска в системе V по фотоэлектрическим наблюдениям для $V1341$ Cyg .

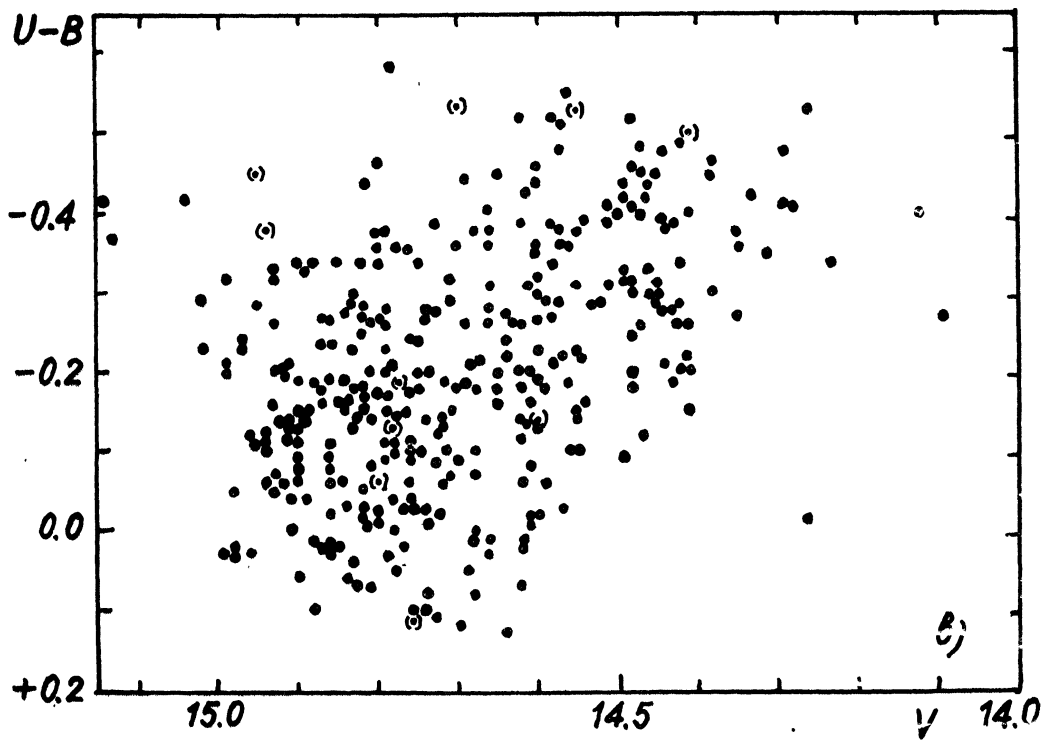


Рис. 4. Зависимость показателя цвета $U-B$ от блеска в системе V для $V1341$ Cyg по фотоэлектрическим наблюдениям.

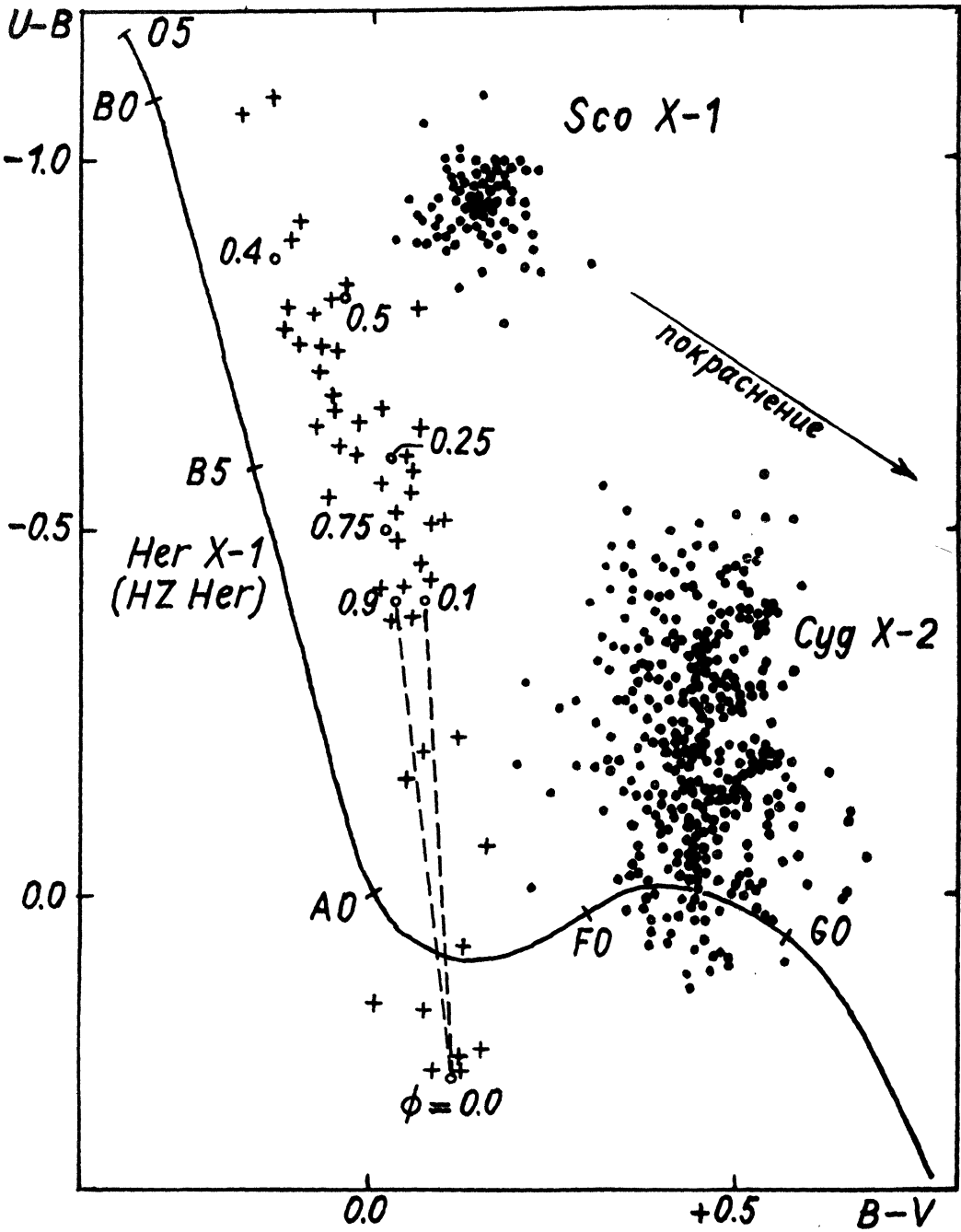
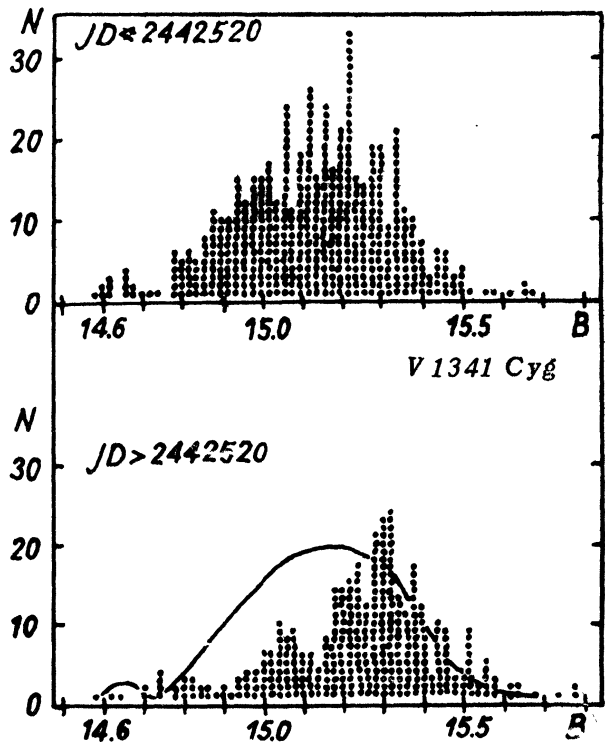


Рис. 5. Фотоэлектрические наблюдения V 1341 Cyg (Cyg X-2), V 818 Sco (Sco X-1) и HZ Her (Her X-1) на двухцветной диаграмме.

Рис. 6.

Гистограммы блеска V 1341 Cyg до середины апреля 1975 г. (JD 2442520) и после этой даты. Заметно общее ослабление блеска звезды в середине апреля 1975 г.



обратного периода. P^{-1} (P —период в сут.) и на рис. 8 а, б — зависимость полуамплитуды периодической составляющей A (P^{-1}) — параметр Курочкина. Результаты обработки различными методами в общих чертах совпадают.

Фотоэлектрические наблюдения в интервале JD 2442247—42570 на рис. 6 выделяют группу суточно-сопряженных периодов, наибольший из которых равен $P_0 = 5^d.92 \pm 0^d.05$. Значения этих периодов сведены в табл. 2.

Таблица 2.

Период	P^{-1}	Как сопряжен с P	Полуамплитуда
$5^d.92 \pm 0^d.05$	0.1689	$1/P_0$	$0^m.137$
0.8528 ± 0.001	1.1726	$1+1/P_0$	0.131
1.2034 ± 0.002	0.8310	$1-1/P_0$	0.130
0.5452 ± 0.0005	1.8341	$2-1/P_0$	0.099
0.4603 ± 0.0003	2.1725	$2+1/P_0$	0.098
—	нет	$3-1/P_0$	< 0.06

Суточно-сопряженные периоды при статистическом спектральном анализе появляются вследствие периодической разрывности (скважности) наблюдаемой функции блеска (наблюдения проводятся лишь в ночное время, а фотоэлектрические наблюдения — в наилучших условиях видимости — вблизи меридиана). При больших хаотических вариациях блеска и малой амплитуде периодической составляющей достоверность различных значений сопряженных периодов неразличима и для того, чтобы выделить реальный период, необходимо привлечь одно-временные наблюдения, производившиеся в западном полушарии Земли.

Суг X-2
Phe B JD 2442247-570

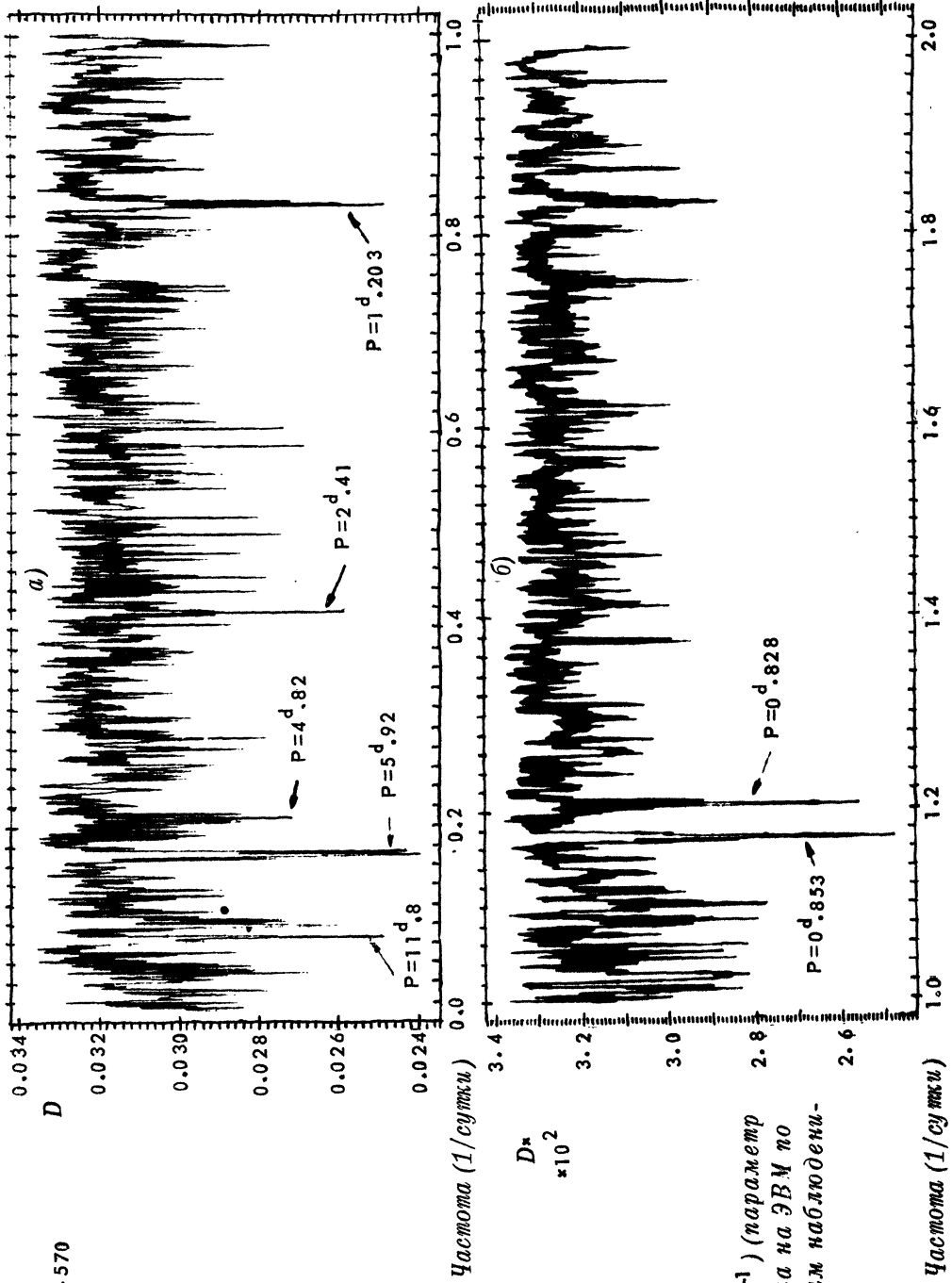


Рис. 7 а, б.
Зависимость $D(P^{-1})$ (параметр Юркевича). Выдача на ЭВМ по фотозлектрическим наблюдениям.

Cyg X-2
 Phe B JD 2442247-684

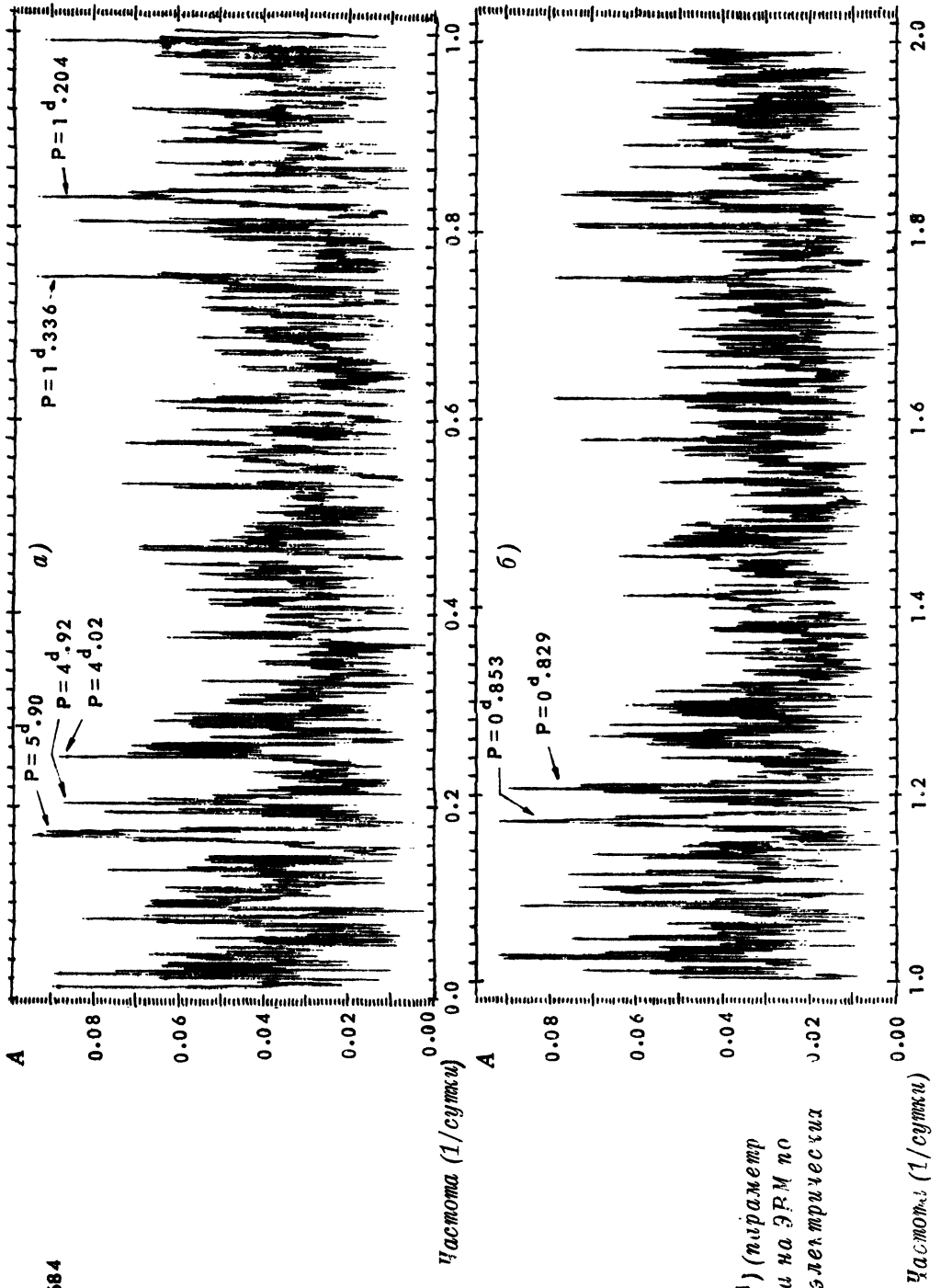


Рис. 8 а, б.
 Зависимость $A(P^{-1})$ (параметр
 Курочкина). Выбачи на ЭРМ по
 полному ряду фотоземлетрясений
 наблюдений.

Сопряженные периоды связаны между собой зависимостью:

$$\frac{1}{P} = N \pm \frac{1}{P_0}; \quad N = 0, 1, 2 \dots$$

Привлечение более поздних наблюдений (до JD 2442684) заметно уменьшает достоверность каждого из этой группы периодов, хотя они еще выделяются в исследованном интервале периодов и по высоте и по ширине всплесков.

Анализ фотографических наблюдений в полном интервале юлианских дат вообще не дает группу сопряженных периодов, выявившихся при анализе фотоэлектрических наблюдений. С очень малой достоверностью он дает пики $P = 0^d.829, 1^d.336, 7^d.34$ ($A < 0^m.1$).

Поиск периодов производился в диапазонах $0^d.1 < P < 100^d$. В интервале $0^d.1 < P < 0^d.33$ по фотоэлектрическим наблюдениям нет никаких периодов, отличных от сопряженных с указанными в таблице 2 значениями. По фотоэлектрическим наблюдениям в интервале $0^d.1 < P < 0^d.5$ вообще нет периодов с $A > 0^m.06$. Спектральный анализ наблюдений в фильтрах U и V дал еще меньшие, чем в B, амплитуды периодических составляющих.

Ранее уже говорилось о том, что характер переменности V 1341 Cyg (Cyg X-2) заметно изменился в середине апреля 1975 года. По фотоэлектрическим наблюдениям до этого момента выделяется группа сопряженных периодов, данная в таблице 2. Интересно отметить, что фотографические наблюдения, проводившиеся в это время, дают наилучшее согласие со вторым периодом, данным в таблице 2, $P = 0^d.8528$. На рисунке 9 показан график сводной кривой блеска с периодом $0^d.8525$, близким к P_2 , до середины апреля 1975 года и после этого момента. Ранние фотографические и фотоэлектрические наблюдения (рис. 9а) выявляют периодическую составляющую с амплитудой примерно $0^m.25$. Поздние наблюдения (рис. 9б) не показывают периодической составляющей, в среднем блеск звезды уменьшился и соответствует минимуму усредненной кривой блеска по ранним наблюдениям.

По-видимому, в середине апреля 1975 года имели место какие-то изменения физических условий, в результате которых резко упала амплитуда регулярной переменности.

Таким образом, оптические наблюдения Cyg X-2 (V 1341 Cyg), имеющиеся в нашем распоряжении, не содержат исчерпывающих свидетельств в пользу двойственной природы этого рентгеновского источника. Однако группу суточно-сопряженных периодов $P_1 = 5^d.92, P_2 = 0^d.8528, P_3 = 1^d.2034$ и периоды $2P_1, 2P_2$ и $2P_3$ желательно проверить дальнейшими оптическими UVV и спектральными наблюдениями.

Замечания о межзвездном поглощении в области Cyg X-2. Измерения 11 звезд в окрестностях Cyg X-2 (табл. 1) можно использовать для качественного анализа поглощения в области Cyg X-2 (для точного анализа недостаточно количество звезд). Считая, что звезды в окрестностях Cyg X-2 относятся к главной последовательности, по двухцветной диаграмме (U-B) - (B-V) можно оценить избыток цвета E_{B-V} и получить полное поглощение A_V . По нашим оценкам $A_V \approx 1^m.5 - 2^m$.

Заметим, что на определение избытка цвета по двухцветной диаграмме влияет еще и неоднозначность приведения на главную последовательность желтых звезд. Однако, положение на диаграмме красных и голубых звезд (в частности, двух звезд с отрицательными $U-B$) указывает на большое поглощение $A_V \approx 2^m$.

Межзвездное покраснение в поле Cyg X-2 исследовали Катей и Хайес (1968). Они пришли к выводу, что поглощение света в области Cyg X-2 очень мало и, следовательно, расстояние до Cyg X-2 не превышает 600–900 пс. Однако вряд ли этот вывод можно считать правильным, так как авторы использовали только звезды ярче 11^m , а Cyg X-2 = V 1341 Cyg гораздо слабее $14-15^m$.

Хотя мы и не ставили целью определение поглощения в области Cyg X-2, наш качественный вывод о значительном поглощении (а следовательно и расстоянии), видимо, ближе к истине, благодаря использованию слабых звезд.

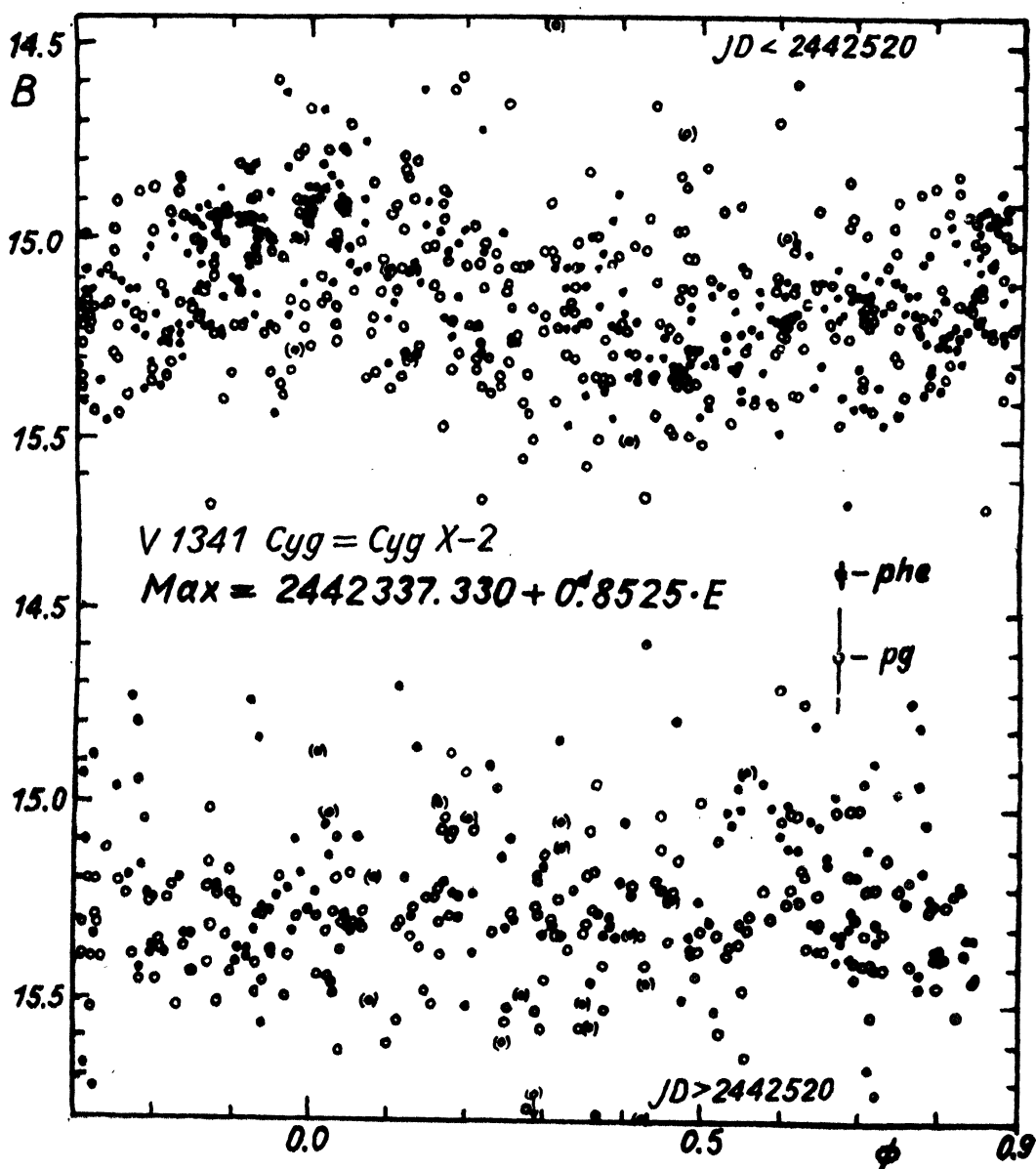


Рис.9. Графики сводной кривой блеска для одного из сопряженных периодов 0.8525 , полученных в данной работе для V 1341 Cyg.

3. Переменная звезда V 818 Sco – рентгеновский источник Sco X-1.

Фотоэлектрические наблюдения Sco X-1 (V 818 Sco) проводились В.М. Лютым по методике, описанной ранее для Суг X-2 на Крымской станции ГАИШ. Данные этих наблюдений опубликованы в работах Лютого (1972) и Лютого и Сюняева (1976).

V 818 Sco – неправильная переменная звезда, изменяющая блеск в пределах $12^m.1 - 12^m.9$ V. Показатели цвета практически не меняются и составляют в среднем $B - V = 0^m.15$, $U - B = -0^m.90$.

В теоретических работах неоднократно высказывались предположения о том, что Sco X-1, самый яркий рентгеновский источник, входит в состав двойной системы. Лютый и др. (1974) предположили, что амплитуда регулярной составляющей блеска в несколько раз меньше, чем амплитуда хаотической составляющей. В этой работе был предложен метод, позволяющий выделить периодическую составляющую на фоне сильных нерегулярных флуктуаций. В качестве наиболее вероятного значения периода Sco X-1 они указали значение $P = 3^d.93$.

Готтлиб и др. (1975) применили эту методику для анализа около 1000 фотографических наблюдений Sco X-1, охватывающих период около 100 лет. Согласно их расчетам наиболее достоверно значение периода $P = 0^d.787313$. Следующими по достоверности являются периоды $P = 3^d.74001$, $0^d.78901$, $0^d.81069$, сопряженные с первым названным значением периода через сутки, год и месяц.

В данной работе мы приводим результаты обработки фотоэлектрических наблюдений Sco X-1 (86 наблюдений), выполненных В.М. Лютым на Крымской станции ГАИШ в период с июня 1972 по август 1975 года (JD 2441477 – 42624), причем 48 из них получены летом 1975 г.

Поиск периодов производился в интервале $0^d.6 < P < 100^d$. Три наиболее достоверных значений периода, полученные в вычислениях, следующие: $3^d.74 \pm 0^d.005$; $1^d.1245 \pm 0^d.0005$; $0^d.7872 \pm 0^d.0003$. Достоверность этих значений периода довольно низка. Отметим, что, согласно формуле (1) (см. Приложение), при значениях $\alpha = 0.12$ (согласно Готтлиб и др. (1975), $P \approx 0^d.8$, $\Delta t = 1000^d$, $\sigma_z^2 \approx 0.1$, характеризующих наши наблюдения Sco X-1, требуется около 400 наблюдений для более или менее уверенного выделения периода $P = 0^d.787$.

Тем не менее, сам факт, что два из трех наилучших значений периода, выявленных при нашем анализе, а именно $P = 3^d.740$ и $P = 0^d.7872$, в точности совпадают с двумя наилучшими значениями периода, найденными Готтлиб и др. (1975), по-видимому не случаен и дает дополнительный аргумент в пользу того, что рентгеновский источник Sco X-1 входит в состав двойной системы, орбитальный период которой совпадает с одним из этих двух значений.

В заключение уместно привести краткую историю спектроскопических исследований периодичности в изменении лучевых скоростей. Вестфол и др. (1968), Крэмpton и Каули (1975) не подтвердили ни один из этих периодов. Линдс и др. (1971) не обнаружили периодических изменений лучевых скоростей по 100 спектрограммам. Однако Каули и Крэмpton (1975) по наблюдениям лучевых скоростей в

в период со 2-го по 8-е июня 1975 г. во время минимального блеска звезды получили отличную кривую лучевых скоростей с амплитудой 115 км/сек с периодом Готтлиб и др. (1975), равным $0^d.787313$.

Таблица 3.

Фотографические наблюдения V1341 Cyg (Cyg X-2) в системе В.

JD Geocentric		JD 2442...		JD 2442...		JD 2442...	
JD 24...	В	JD 2442...	В	JD 2442...	В	JD 2442...	В
17852.338	15.34	317.266	14.97	339.228	15.38	362.149	15.21
38320.312	14.78	.456	14.84	.252	15.24	.155	15.29
42269.335	15.36	320.365	14.91	.260	15.41	.271	15.06
271.419	15.11	322.197	14.65	.268	15.43	.303	15.02
272.518	14.89	325.207	15.19	.276	15.50	363.154	15.19
277.431	15.15	327.194	14.97	.299	15.40	.170	15.21
278.441	15.02	329.179	14.65	.319	15.29	.186	15.15
.443	15.04	.205	14.83	.331	15.57	.197	15.34
279.449	15.12	.251	14.92	.346	15.50	.203	15.20
280.445	15.33	.310	14.68	.358	15.35	.213	15.34
281.381	15.34	330.238	14.94	.399	15.65	.223	15.24
282.486	15.23	.266	15.21	.409	15.44	.229	15.28
283.399	15.06	.434	15.21	.422	15.47	.247	15.22
284.260	15.21	331.193	15.34	.444	15.36	.258	15.28
.553	15.07:	.337	15.27::	340.390	15.33	.277	15.34
285.286	14.59	332.188	15.15	.409	15.12	.301	15.24
.309	14.78	.203	15.16	341.279	15.15	.315	15.49
286.282	15.29:	.342	15.28	.325	15.24	.327	15.51
.315	15.14	.392	15.32	.344	15.21	.335	15.39
.357	15.21	.415	15.34	.399	15.21	.363	15.45
.543	15.02	.498	15.17	.469	15.12	364.149	15.34
287.465	15.09	333.198	15.11	343.177	15.05	.154	15.33
.508	15.27	.267	15.06	.185	15.12	.262	15.08
.553	15.18	.353	15.00:	.285	15.22	.268	15.23
288.258	15.10	.377	14.98	.309	15.14	.356	15.25
.301	15.04	.433	14.94	.322	15.21	.362	15.14
.343	15.12	334.245	15.05	.360	15.19	.433	14.97
.414	15.20	335.169	15.36	.368	15.13	365.160	15.11
.516	14.96	.179	15.34	.395	15.28	.169	15.10
.561	14.86	.513	15.67	.478	15.29	.194	14.95
289.413	15.32	336.189	15.20	.488	15.25	.331	14.99
.546	15.22	.228	14.98	344.172	14.92	.338	15.00
.566	15.32	.307	15.11	.179	14.98	366.158	14.92
294.262	15.12	.319	15.30	.248	14.82	.167	15.15
.501	15.38	.394	15.12	.256	14.89	.174	14.93
295.280	15.46:	337.184	14.83	.270	15.02	.181	14.94
.524	15.38	.212	14.87	.293	15.05	.208	15.09
296.300	15.23	.221	14.93	.313	15.06	.215	15.00
.472	15.33	.234	14.91	.330	15.05	.297	14.93
297.255	15.26	.244	15.21	.347	15.03	.303	14.95
.486	15.06	.260	15.04	.360	15.10	.409	14.79
298.337	15.23	.268	14.99	345.173	15.22	.416	14.84
.434	15.35	.281	15.00	.179	15.29	367.153	14.77
300.456	15.29	.295	15.05	.411	15.27	.159	14.92
.513	15.34	.312	14.99:	.419	15.27	368.150	15.01
303.235	15.16	.324	14.66	348.322	15.33	.158	14.90
.249	15.16	.334	15.09	351.178	15.30	.163	14.94
308.250	15.39	.344	14.77	.315	15.50:	.270	15.22
.404	15.34	.358	14.92	352.198	15.20	.276	14.90
.493	15.20	.359	14.82	353.178	15.12	.280	15.04
310.236	15.66	.367	14.70	358.191	15.11	.410	15.21
311.295	15.48	.380	15.00	.388	15.36	.416	15.14
.314	15.28	.392	14.85	.446	15.18	369.149	15.28
312.496	15.17	.411	14.93	359.152	15.26	.157	15.11
313.933	15.12	.422	15.34	.158	15.24	.271	14.97
314.265	15.03	.440	14.80	.275	15.28	.281	15.04
.427	15.26	.472	14.87	.281	15.43	.380	15.27
316.271	15.02	.481	14.61	.442	15.23	.388	14.98:
.426	14.86	.491	14.58	361.152	15.33	.401	15.38
.449	14.82	339.215	15.36	.163	15.35		

Таблица 3 (продолжение)

JD 24...	В	JD 2442...	В	JD 2442...	В	JD 2442...	В
42369.408	15.26	549.515	15.43	578.350	15.31	653.460	15.19
370.242	15.19	.519	15.25	.354	15.40	654.347	15.31
.249	15.38	550.484	15.30	.458	15.31	655.341	15.63
371.179	15.16	.488	15.30	.492	15.33	.442	15.50
.186	15.16	.494	15.30	.496	15.23	.523	15.77
.191	15.42	551.369	15.5 ::	580.446	15.31	.581	15.04 :
.338	15.45	.520	15.51	599.439	15.27	656.287	15.47
373.198	15.23	552.456	15.3 ::	601.465	15.26	.381	15.27
.212	15.37	556.422	14.81	602.483	15.13	659.395	15.25
.276	15.47	.438	15.02 :	605.497	15.06	.475	15.40
.365	15.55	.485	15.18	606.489	14.81	660.238	15.45
407.151	15.09	.517	15.29	607.497	14.63	.438	15.32
425.160	15.27	558.430	15.56	608.481	14.73	.507	15.61
426.163	14.96	.470	15.32 :	609.446	14.81	661.247	15.31
427.176	15.21	.492	15.45 :	610.505	14.78	.416	15.29
.194	15.01	.516	15.23	623.313	15.13	.560	15.32
428.159	14.90	55 9.448	14.90 :	624.360	15.26	662.240	15.26
.168	15.07	.483	14.69	.383	15.40	.427	15.32
429.184	14.99	.515	14.73	625.417	15.28	.574	15.08
.207	14.88	562.394	15.43	.496	15.45	663.245	15.28 :
.658	14.68 :	.427	15.17	626.349	15.19	.363	15.02
430.178	14.82	.483	15.55	.432	15.33	.506	15.01
.188	14.88	.505	15.36	.534	15.55	.568	15.00
.658	15.05 :	563.384	15.03	627.319	15.37	664.358	15.20
431.177	15.04	.456	15.30	.423	15.18	665.245	15.36
.198	15.07	.481	15.25	.528	15.20	.388	15.21
.654	14.98 :	.506	15.32	628.339	15.16	.514	15.38
432.233	15.17	564.393	15.17	.524	15.20	666.568	15.06
.647	15.03	.396	15.06	629.338	15.35 :	667.229	15.28
476.587	14.82	.399	15.26	.432	15.21	.394	14.86
477.591	15.23	.485	15.21	630.289	15.29	.553	14.94
478.599	15.19	.516	14.98	.418	15.45	668.238	15.06
479.617	14.80	565.370	15.31	.532	15.45	.398	15.30
480.583	14.77	.471	15.01	631.300	15.36	.577	15.27
481.589	15.00	.515	15.00	.405	15.18	669.310	15.32
484.594	15.02	566.518	15.43	.533	15.03	.467	15.24
486.595	15.09	567.442	15.48	632.298	15.28	670.554	15.51
487.578	15.12	568.338	15.08	.419	15.23	671.269	15.52
.608	15.16	.499	15.18	.535	15.25	.449	15.41
488.511	15.06	.503	15.08	633.294	15.27	672.213	15.55
489.597	15.02	.507	15.07	.399	15.12	676.303	15.23
504.568	15.32	570.435	15.19	.536	15.34	685.248	14.96
508.555	15.19	.439	15.20	634.323	15.52	.297	14.99
509.576	15.14	.442	15.10	635.326	15.63	686.413	15.06
510.572	15.14	571.377	15.34	.534	15.37	687.290	15.11
511.572	15.35	.381	15.29	636.350	15.23	.325	15.23
513.556	15.20 :	.384	15.46	.550	15.27	688.313	15.44
514.514	15.16	.446	15.15	637.292	15.15	689.354	15.31
520.513	14.98	.450	15.16	.542	15.23	.388	15.35
.547	14.87	.453	15.35	639.385	15.23	691.257	15.27
.549	14.88	572.503	15.21	.555	15.32	.335	15.10
525.517	15.20	.506	15.39	640.258	15.56	.373	15.06
526.553	15.49	.509	15.21	.388	15.36	692.190	15.23
530.505	15.03	573.489	15.44	.556	15.43	693.283	15.25
534.419	14.91	.493	15.27	641.433	15.29	696.330	15.18
535.470	15.79	.497	15.48	.558	15.01	697.219	15.17
.505	15.21	.500	15.37	642.479	15.37	.381	15.12
537.419	15.20	575.421	15.52	.558	15.29	698.391	15.29
.498	15.35	.425	15.57	643.512	15.21	701.313	15.30
.508	15.25 ::	.430	15.44	644.555	15.30	706.231	15.58 :
541.524	15.57	.490	15.78	650.250	15.27 :	.288	15.33
.530	15.37	.494	15.54	651.294	15.27	707.378	15.38
542.533	15.39	.498	15.52	.413	15.40	717.341	14.62
543.525	15.21	577.473	15.38	.522	15.31	721.338	15.12
.528	15.23	.477	15.40	652.318	15.36	728.204	15.23
544.532	15.08	.480	15.31	.401	15.27	731.212	15.19
546.472	15.31	.483	15.39	.526	15.12	732.194	15.51
549.509	15.17	578.347	15.20	653.339	15.16		

Таблица 3 (продолжение)

Фотографические наблюдения V 1341 Cyg (Cyg X-2) в системе V.

JD Geocentric.

JD 24...	V	JD 2442... V	JD 2442... V	JD 2442... V
42507.579	14.77	562.435 14.80	577.500 15.07	644.322 15.07:
508.578	14.72	.476 14.81	.504 15.02	.546 14.83
520.560	14.45	.499 14.74	.508 14.94	650.243 14.98
534.519	14.60	.526 14.63	.511 14.84	651.242 15.01
535.482	14.59	563.463 14.94	578.500 14.42	652.391 14.85
546.529	14.2:	.468 14.83	.504 14.40	653.372 14.80
549.529	14.68	.513 14.82	.508 14.35	654.340 14.96
550.524	15.10	.528 14.68	.511 14.48	655.534 15.07
551.382	14.98	564.407 14.77	.521 14.42	659.580 14.93
556.412	14.71:	.412 14.93	623.324 14.62	660.517 14.92
.493	14.57	.415 14.67	624.366 15.06	661.551 14.78
.524	14.90	.494 14.53	625.506 15.04	662.583 14.64
557.458	14.96	.523 14.43	626.441 14.84	663.580 14.59
.489	15.12	565.359 15.2:	627.535 14.74	664.376 14.73
.510	15.00	.460 14.90	628.532 14.69	667.239 14.72
.526	15.25:	.522 14.68	630.540 14.98	668.238 14.62
558.422	14.50	566.526 15.04	631.541 14.33	669.319 14.89
.437	14.52	568.523 14.93	632.544 14.72	671.280 14.78
.477	14.59	572.367 14.79	633.285 14.80	.438 14.81
.498	14.57	.371 14.66	635.542 14.90	672.222 14.71
.522	14.44	.375 14.71	637.552 14.77	704.178 15.12
559.440	14.33:	573.506 14.78	639.335 14.80	706.274 14.87
.476	13.78	.510 14.82	640.266 14.89	717.361 13.94
.520	13.98	575.503 14.98	641.326 14.71	732.212 14.83
.531	13.73	.507 14.78	642.466 14.55	
.562	14.82	.510 14.90	643.398 14.38	

Приложение.

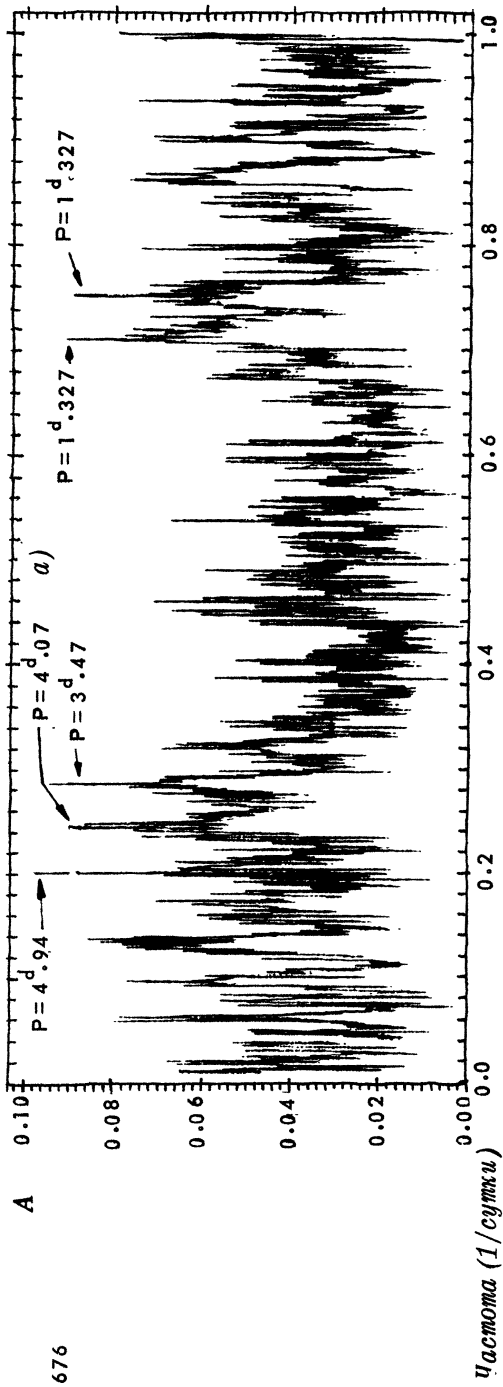
О методике математической обработки наблюдательных данных.

Анализ наблюдательных данных проводился на ЭВМ БЭСМ-6 с помощью программы, подробно описанной в работе Баско (1976). Программа основана на двух независимых алгоритмах, предложенных ранее Юркевичем (1971) и Курочкиным (1973). В обоих алгоритмах производится последовательный перебор значений периода с шагом:

$$\Delta\left(\frac{1}{P}\right) = \frac{1}{L \cdot \Delta t},$$

где Δt — интервал времени, охватываемый наблюдениями, а L — целое число, показывающее на сколько равных частей в процессе вычислений разбивается интервал фаз $0 \leq \phi < 1$ (Все приводимые в данной работе результаты были получены при $L = 6$). Для каждого из перебираемых значений периода P вычислялись: а) средний квадрат отклонения D от усредненной кривой блеска (алгоритм Юркевича); величина D в этой работе называется дисперсией (см. рис. 7 а, б); б) коэффициент корреляции A с синусоидой $\sin(2\pi t/P + \psi)$ (алгоритм Курочкина) причем нормировка A и фаза ψ подбирались таким образом, чтобы функция $A \sin(2\pi t/P + \psi)$ давала наилучшее приближение к кривой $m(t) - \bar{m}$ (звездная величина в функции времени). Величина A называется полуамплитудой периодической составляющей (рис. 8). Период P считается тем достовернее, чем меньше дисперсия

Сур X-2
P 9 В JD 2442269-676



238

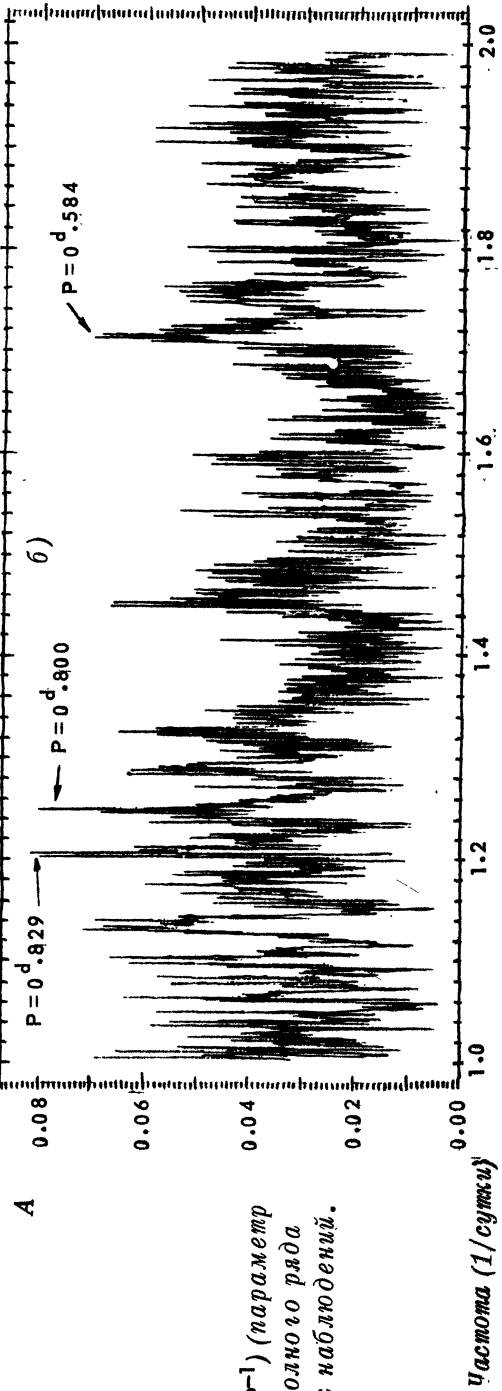


Рис 10 а, б.
Зависимость $A(P^{-1})$ (параметр Курочкина) для полного ряда фотографических наблюдений. Выдача на ЭВМ.

$D(P)$ и чем больше полуамплитуда $A(P)$. Вычисленные значения $D(P^{-1})$ и $A(P^{-1})$ выводились на графопостроитель — эти графики представлены на рис. 7, 8, 10.

Остановимся вкратце на статистических свойствах величины D . Для этого рассмотрим два простых примера.

1). Пусть измеренные значения звездной величины $m_i = m_0 + z_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$), где z_1, z_2, \dots, z_N — случайная выборка из нормальной совокупности с параметрами $\langle z \rangle = 0, \langle z^2 \rangle = \sigma_z^2$. Тогда величина ND/σ_z^2 имеет χ^2 -распределение с $N-L$ степенями свободы [см. Баско, 1976]. Чтобы оценить достоверность периода при неизвестном значении σ_z^2 , наряду с $D(P)$ вводится величина

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2, \quad \text{где } \bar{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i.$$

В нашем случае величина NS/σ_z^2 имеет χ^2 -распределение с $N-1$ степенями свободы. Если бы D и S определялись по двум независимым выборкам, то отношение $\frac{(N-1)D}{(N-L)S}$ имело бы ν^2 -распределение с $(N-L, N-1)$ степенями свободы. При оценке достоверности периода P используется значение вероятности:

$$Pr(P) = Pr[\nu^2(N-L, N-1) \geq \frac{N-1}{N-L} \frac{D(P)}{S}]$$

(чем меньше $Pr(P)$, тем достовернее период P).

При $N \gg L > 1$ величина D распределена асимптотически нормально со средним значением $\langle D \rangle = \sigma_z^2$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma_z^2 \sqrt{2/N}$. Отсюда следует важный вывод, что при постоянном уровне шума в наблюдательных данных m_i статистический разброс величины D убывает обратно пропорционально \sqrt{N} с ростом числа наблюдений N . Отметим, что в силу центральной предельной теоремы этот вывод не зависит от конкретного вида функции случайной величины z , описывающей шум.

2). Пусть $m_i = m_0 + z_i + a \sin(2\pi t_i / P_0)$, где моменты t_i не коррелируют с периодом P_0 . Наибольший интерес для нас представляет случай, когда мощность регулярной составляющей $a^2/2 < \sigma_z^2$. При $N \gg L > 1$ величина S распределена асимптотически нормально со средним значением $\langle S \rangle = \sigma_z^2 + a^2/2$ и среднеквадратичным отклонением $\sim (\sigma_z^2 + a^2/2) \sqrt{2/N}$. Аналогичным образом распределена и величина $D(P)$, если $P \neq P_0, 2P_0, \dots, LP_0$. Однако при большом числе наблюдений значение

$$\langle D(P_0) \rangle \leq \sigma_z^2 + a^2 \frac{\pi^2}{3L^2}$$

существенно отличается (при $L \geq 6$) от $\sigma_z^2 + a^2/2$. По этой причине вероятность $Pr(P_0)$ будет быстро убывать:

$$Pr(P_0) \approx (2\pi N)^{-1/2} y^{-1} \exp(-y^2 N/2) \quad \text{при } N \gg y^{-2},$$

где

$$y = \frac{1}{2} \ln(1 + a^2/2\sigma_z^2),$$

с ростом числа наблюдений N , тогда как вероятности $Pr(P)$ для других

периодов, не связанных с P_0 , в среднем не меняются. Тем самым мы показали, что используемый метод позволяет в принципе при достаточно большом числе наблюдений выделить регулярную составляющую на фоне как угодно большого шума.

Значение $Pr(P_0)$ желательнее было бы трактовать как оценку вероятности того, что дисперсия $D \leq D(P_0)$, где $D(P_0)$ вычислено для выбранного наугад значения периода P_0 . Нетрудно понять, что поскольку S и $D(P_0)$ вычисляются по одной и той же выборке $\{m_i\}$ (а не по двум независимым), то отношение D/S изменяется от периода к периоду в гораздо более узком интервале, чем следовало бы ожидать при наличии двух независимых выборок, и $Pr(P_0)$ дает слишком "пессимистическую" (преувеличенную) оценку указанной выше вероятности. Более "перспективной" с этой точки зрения представляется величина

$$G = N(S - D)/\sigma_z^2 \geq 0,$$

которая (в рамках предположений 1) имеет χ^2 -распределение с $L - 1$ степенями свободы. Действительно, при $N \gg L$ и более или менее равномерном распределении моментов t_i значения $G(P_1)$ и $G(P_2)$ можно считать независимыми, как только $|P_1^{-1} - P_2^{-1}| \geq 1/\Delta t$.

С помощью величины $G(P)$ можно дать оценку для минимального числа наблюдений N , которое необходимо, чтобы при данном отношении мощности $a^2/2$ регулярной составляющей с периодом P_0 к мощности шума σ_z^2 можно было бы выделить эту составляющую с вероятностью ϵ :

$$N \geq 4 \frac{\sigma_z^2}{a^2} \ln \frac{\Delta t}{\epsilon P}. \quad (1)$$

здесь ϵ — вероятность того, что локальный минимум $D(P_0)$ функции $D(P)$, выявленный в результате переборки $\Delta t/P$ независимых значений периода, является случайным выбросом.

Статистические свойства величины A не удается продемонстрировать столь же простым образом. Можно, однако, показать, что если моменты наблюдений t_i распределены более или менее равномерно, то в случае 1) $\langle A^2 \rangle \approx 4/N$, тогда как в случае 2) $\langle A^2(P_0) \rangle \approx a^2$. Другими словами, если наблюдаемый сигнал $m(t)$ не содержит гармоник с периодом P , то как статистический разброс, так и среднее значение амплитуды A убывает пропорционально $1/\sqrt{N}$ с ростом числа наблюдений N ; если же $m(t)$ содержит гармонику с периодом P_0 и амплитудой a , то $A \rightarrow a$ при $N \rightarrow \infty$.

Литература.

- Баско М.М., 1976, ПЗ приложение 2, № 11, 337.
 Вестфол и др., 1968 — Westphal J., Sandage A., Kristian J., ApJ 154, 139.
 Готтлиб и др., 1975 — Gottlieb E.W., Wright E.L., Liller W., ApJ 195, L33.
 Катей и Хайес, 1968 — Cathey L.R., Hayes J.E., ApJ 151, L89.
 Каули и Крэмpton, 1975 — Cowley A.P., Crampton D., ApJ 201, L65.
 Крэмpton и Каули, 1975 — Crampton D., Cowley A.P., ApJ 197, 467.
 Курочкин Н.Е., 1973, ПЗ 19, 117.
 Линдс и др., 1971 — Lynds C.R., Mook B.D., Hiltner W.A., ApJ Letters 163, L69.

Лютыи В.М., 1972, ПЗ 18, №5, 417.

Лютыи и др., 1974 – Лютыи В.М., Сюняев Р.А., Шакура Н.И., АЖ 51, 905.

Лютыи В.М., Сюняев Р.А., 1976, АЖ 51, 511; препринт ИКИ № 258.

Юркевич, 1971 – Jurkevich I., *Astroph. and Sp. Sci.* 13, 154.

Государственный астрономический
институт им. П.К. Штернберга
Институт космических исследований

*Поступила в редакцию
22 июля 1976 г.*