FTAMP 41.23.17 https://doi.org/10.26577/RCPh20994226

Е.К. Ашимов*
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
*e-mail: yeskendyr@gmail.com

FS CMa ТИПТЕС ҚОС ЖҮЙЕНІҢ ФОТОМЕТРИЯЛЫҚ ӨЗГЕРГІШТІГІ МЕН ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ БАЙЛАНЫСЫН САНДЫҚ ЗЕРТТЕУ

FS CMa типтес нысандар – эволюциялық мәртебесі әлі күнге дейін талқыланып келе жатқан, ыстық шаңы бар эмиссиялық B[e]-жұлдыздар. Жинақталған деректер олардың едәуір бөлігі масса алмасу сатысынан өткен немесе өтіп жатқан қос жүйелер екенін көрсетеді. Осы мақалада FS CMa типтес қос жүйенің фотометриялық өзгергіштігінің сандық моделі құрылды. Ол эллипсоидтық құраушыны, шағылысу эффектісін, тыныстық модуляцияланған масса тасымалымен байланысты периастрлық жарқырауды, сондай-ақ апериодтық «қызыл» құраушы мен ақ фотометриялық шуылды қамтиды. Параметрлер торында (массалар қатынасы q, эксцентриситет e, еңкею i, орбиталық период P) жерүсті шолуларының және TESS типтес ғарыштық фотометрияның нақты уақыт торларымен жарқырау қисықтары синтезделді. GLS-периодограмма, PDM және терезелік уақыт-жиілік талдау әдістерімен орбиталық сигналдың анықталғыштығы зерттелді. Монте-Карло әдісімен анықталу карталары, ал MCMC әдісімен параметрлердің апостериорлық үлестірімдері тұрғызылды. Амплитудасы $\gtrsim(4–6)\cdot10^{-3}$ ағын болатын периастрлық жарқырау ұзақтығы ≈4 жыл жерүсті қатарларында эксцентриситетке іс жүзінде тәуелсіз түрде сенімді анықталатыны, ал эллипсоидтық өзгергіштік тек ғарыштық фотометрияға және тек қысқа периодты жүйелер үшін ғана қолжетімді екені көрсетілді. Период пен эксцентриситет фотометрия бойынша жоғары дәлдікпен қалпына келтіріледі (периодтың медианалық қатесі 0,08%, эксцентриситеттің орташа квадраттық қатесі 0,05), ал q, i және периастр аргументі фотометриямен іс жүзінде шектелмейді.

Түйін сөздер: FS CMa типтес жұлдыздар, B[e]-феномен, қос жүйелер, фотометриялық өзгергіштік, жарқырау қисықтары, периодограммалық талдау, сандық модельдеу.

Ye.K. Ashimov
Farabi University, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: yeskendyr@gmail.com

Numerical study of the relation between photometric variability and the parameters of an FS CMa-type binary system

FS CMa-type objects are emission-line B[e] stars with hot dust whose evolutionary status remains under debate. Growing evidence indicates that a significant fraction of them are binaries that have passed through, or are currently undergoing, a stage of mass exchange. We construct a numerical model of the photometric variability of a generic FS CMa-type binary that includes an ellipsoidal component, the reflection effect, periastron brightening associated with tidally modulated mass transfer, as well as an aperiodic “red” component and white photometric noise. Light curves were synthesised over a grid of parameters (mass ratio q, eccentricity e, inclination i, orbital period P) using realistic time sampling of ground-based surveys and TESS-like space photometry. The detectability of the orbital signal was studied by means of the GLS periodogram, PDM and windowed time–frequency analysis. Detectability maps were built by Monte Carlo simulations and posterior parameter distributions by MCMC. Periastron brightening with an amplitude $\gtrsim(4–6)\cdot10^{-3}$ of the flux is shown to be confidently detected in ground-based time series about 4 years long almost independently of eccentricity, whereas ellipsoidal variability is accessible only to space photometry and only for short-period systems. The period and the

© 2026 Al-Farabi Kazakh National University

eccentricity are recovered from photometry with high accuracy (median period error 0.08%, rms eccentricity error 0.05), while q, i and the argument of periastron remain essentially unconstrained by photometry.

Keywords: FS CMa-type stars, B[e] phenomenon, binary systems, photometric variability, light curves, periodogram analysis, numerical modelling.

Е.К. Ашимов
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан
*e-mail: yeskendyr@gmail.com

Численное исследование связи фотометрической переменности и параметров двойной системы типа FS CMa

Объекты типа FS CMa — это эмиссионные B[e]-звёзды с горячей пылью, эволюционный статус которых остаётся предметом дискуссии. Всё больше данных указывает на то, что значительная их часть является двойными системами, прошедшими или проходящими стадию обмена массой. В данной статье построена численная модель фотометрической переменности обобщённой двойной системы типа FS CMa, включающая эллипсоидальную компоненту, эффект отражения, периастронное поярчание, связанное с приливно-модулированным переносом массы, а также апериодическую «красную» компоненту и белый фотометрический шум. На сетке параметров (отношение масс q, эксцентриситет e, наклонение i, орбитальный период P) синтезированы кривые блеска с реалистичными временными сетками наземных обзоров и космической фотометрии типа TESS. Методами GLS-периодограммы, PDM и оконного время-частотного анализа исследована обнаружимость орбитального сигнала. Методом Монте-Карло построены карты обнаружимости, а методом MCMC — апостериорные распределения параметров. Показано, что периастронное поярчание с амплитудой $\gtrsim(4–6)\cdot10^{-3}$ потока уверенно выявляется в наземных рядах длительностью ≈4 года практически независимо от эксцентриситета, тогда как эллипсоидальная переменность доступна лишь космической фотометрии и только для короткопериодических систем. Показано, что период и эксцентриситет восстанавливаются по фотометрии с высокой точностью (медианная ошибка периода 0,08%, среднеквадратическая ошибка эксцентриситета 0,05), тогда как q, i и аргумент периастра фотометрией практически не ограничиваются.

Ключевые слова: звёзды типа FS CMa, B[e]-феномен, двойные системы, фотометрическая переменность, кривые блеска, периодограммный анализ, численное моделирование.

Кіріспе

B[e]-феномен – бұл ыстық жұлдыздың спектрінде төмен иондану сатыларына жататын рұқсат етілген және тыйым салынған эмиссиялық сызықтардың бір мезгілде болуы, сондай-ақ жұлдыз маңындағы ыстық шаңның бар екенін көрсететін күшті инфрақызыл артық сәулеленудің байқалуы, эволюцияның мүлдем әртүрлі сатысындағы нысандарда кездеседі [1]. Олардың ішінде А.Мирошниченко [2] жеке топқа бөліп көрсеткен FS CMa типтес нысандар ерекше орын алады: бұлар спектрлік кластары O9–A2 және жарқырағыштығы бас тізбек жұлдыздарына немесе шамалы эволюциялаған нысандарға тән, алайда аномальді күшті эмиссиялары мен жуырда болған немесе әлі жалғасып жатқан шаң түзілу белгілері байқалатын жұлдыздар. Топтың классикалық прототипі FS CMa (HD 45677) жұлдызы болады, оның тәуліктен ондаған жылға дейінгі уақыт масштабтарындағы, амплитудасы ≈1 жұлдыздық шамаға дейін жететін фотометриялық өзгергіштігі көпжылдық бақылау қатарларымен құжатталған [3].

FS CMa нысандарындағы жұлдыз маңы затының шығу тегі шешімін таппаған түйінді мәселе болады. Мұндай спектрлік кластағы жалғыз жұлдыздардың желі тығыз газ-шаң қабықтарын түзуге жеткілікті қуатты болмайды, сондықтан ең көп қарастырылатын гипотеза FS CMa феноменін қосарлықпен байланыстырады: тығыз қос жүйедегі ағымдағы немесе жуырда

болған масса алмасумен не компоненттердің бірігуімен [2]. Бұл гипотеза бірқатар нысан үшін тікелей расталды. AS 386 үшін периоды 131,27 ± 0,09 тәулік болатын спектроскопиялық орбита және қара құрдымға үміткер көрінбейтін массивті серік анықталды [4]. MWC 645 үшін қосарлық көрсетіліп, компоненттер параметрле-ріне шектеулер алынды [5, 6]. MWC 728 үшін консервативті емес масса тасымалын ескеретін эволюциялық модельдеу периоды ≈27,5 тәулік болатын бақыланатын орбитаны жаңғыртады [7]. Сонымен қатар топтың бір бөлігі үшін аралық массалы жұлдыздардың бірігу сценарийі талқыланады [8]. Мұндай жүйелердің эволюциялық мәртебесін анықтаудың жаңа статистикалық тәсілдері, соның ішінде спектрлік деректерді ақпараттық-энтропиялық талдау да дамып келеді [9-11].

FS CMa типтес жалпыланған қос жүйенің фотометриялық өзгергіштігінің қайталанымды сандық моделін құру және орбиталық сигналдың нақты бақылау жағдайларында қандай шарттарда анықталатынын, сондай-ақ фотометрия бойынша жүйенің қандай параметрлерін қалпына келтіруге болатынын жүйелі түрде айқындау осы жұмыстың мақсаты болып табылады.

Жұмыстың жаңалығы: жарқыраудың орбиталық модуляциясының үш детерминацияланған механизмі мен FS CMa нысандарына тән стохастикалық құраушыны бір модельде біріктіріп, Монте-Карло әдісімен анықталу карталарын және MCMC әдісімен кері есептің шешімін жүйелі түрде тұрғызуда.

Зерттеу әдісі

Қос жүйенің фотометриялық өзгергіштігінің физикалық моделі

Массасы M_1 және радиусы R_1 болатын басты компонент – B-жұлдыздан және массасы $M_2 = qM_1$ болатын, толық ағынға қосатын үлесі аз, аз массалы серіктен тұратын қос жүйе қарастырылады. Компоненттер периоды P, эксцентриситеті e, еңкеюі i және периастр аргументі ω болатын кеплерлік орбита бойынша қозғалады. Серіктің басты жұлдызға қатысты t мезетіндегі орны Кеплер теңдеуінің шешімімен анықталады

$$E - e\sin E = M, \quad M = \frac{2\pi(t - t_p)}{P}, \qquad (1)$$

мұндағы E - эксцентрлік аномалия, t_p - периастрдан өту мезеті. Шынайы аномалия v мен компоненттер арасындағы қашықтық r мына қатынастардан табылады

$$\tan\frac{v}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}\tan\frac{E}{2}, \qquad (2)$$
$$r = a(1 - e\cos E),$$

ал орбитаның үлкен жарты осі a – Кеплердің үшінші заңынан

$$a^3 = \frac{G(M_1 + M_2)P^2}{4\pi^2}. \qquad (3)$$

Серік қашықтығының көру сәулесіне проекциясы $z/r = \sin(v + \omega)\sin i$ шамасымен беріледі: $z > 0$ болғанда серік басты жұлдыздың алдында орналасады.

Ағынның салыстырмалы вариацияларының $\Delta F/F$ моделі үш детерминацияланған құраушыдан тұрады. Олардың әрқайсысының айқын физикалық мағынасы және өзіне тән фазалық сигнатурасы бар.

Басты жұлдыздың серік тарапынан тыныстық деформациялануы көрінетін ауданның және беттің жергілікті эффективті температурасының модуляциясын тудырады; жарқыраудың максимумдары квадратураларға, яғни орбиталық периодтың жартысына сәйкес келеді. Бірінші жуықтауда [12]

$$\frac{\Delta F_{\rm ell}}{F} = A_{\rm ell}\left(\frac{a}{r}\right)^3\cos 2(v + \omega),$$
$$A_{\rm ell} = 0{,}15\,\frac{(15+u)(1+\tau)}{3-u}\,q\left(\frac{R_1}{a}\right)^3\sin^2 i, \qquad (4)$$

мұндағы u - шетке қарай күңгірттену коэффициенті, τ – гравитациялық күңгірттену коэффициенті (B-жұлдыздардың радиациялық қабықтарына тән u = 0,6 және τ = 0,4 мәндері қабылданған), $(a/r)^3$ көбейткіші эксцентрлік орбитаның периастрында тыныстық әсердің күшеюін сипаттайды.

Серіктің ыстық басты жұлдызға қараған жарты сферасы жұтылған ағынды қайта сәулелендіреді; «күндізгі» жарты сфераның көрінетін үлесі орбиталық фазаға қарай өзгереді:

$$\frac{\Delta F_{\rm refl}}{F} = A_{\rm refl}\left(\frac{a}{r}\right)^2\frac{1 - \sin(v + \omega)\sin i}{2}, \qquad (5)$$

мұндағы $A_{\rm refl} \propto (R_2/a)^2$ – амплитудасы серіктің өлшемімен және оның альбедосымен анықталады

әрі біз оны еркін феноменологиялық параметр ретінде қарастырамыз.

Эксцентрлік жүйеде масса алмасу қарқыны және оған ілесетін аккрециялық жарқырағыштық орбиталық қозғалыспен модуляцияланады: тыныстық ұйтқу мен Лагранж нүктесіндегі зат тығыздығы периастр маңында күрт артады. Бұл эффектіні компоненттер арасындағы қашықтықтың дәрежелік функциясымен параметрленеді

$$\frac{\Delta F_{\rm acc}}{F} = A_{\rm p}\, w(r),$$
$$w(r) = \frac{[(1-e)a/r]^{\gamma} - w_0}{1 - w_0}, \qquad (6)$$
$$w_0 = \left(\frac{1-e}{1+e}\right)^{\gamma},$$

нормалау периастрда $w = 1$, ал апастрда $w = 0$ болатындай етіп таңдалған; $\gamma = 3$ көрсеткіші тыныстық әсерлесудің қашықтыққа қарай тез кемуіне ($\propto r^{-3}$) сәйкес келеді. $A_{\rm p}$ амплитудасы аккрециялық жарқырағыштықтың орбиталық период жиілігінде ағынға қосатын толық үлесін береді. Дөңгелек орбита үшін эффект тепе-тең нөлге тең.

Толық модельдік жұлдыздық шама былайша жазылады

$$m(t) = m_0 - 2{,}5\lg\left[1 + \frac{\Delta F_{\rm ell} + \Delta F_{\rm refl} + \Delta F_{\rm acc}}{F}\right] + x_{\rm DRW}(t) + \varepsilon(t), \qquad (7)$$

мұндағы $\varepsilon(t)$ – дисперсиясы σ^2 болатын ақ фотометриялық шуыл, $x_{\rm DRW}(t)$ – FS CMa нысандарына тән желдің, қабықтың және шаң түзілудің тұрақсыз өзгергіштігін модельдейтін апериодтық құраушы. Ол үшін астрофизикалық көздердің стохастикалық өзгергіштігін сипаттауда өзін жақсы көрсеткен Орнштейн–Уленбек процесі (сөнуші кездейсоқ адымдау, damped random walk, DRW) қабылданған [13]. Біркелкі емес уақыт торында процесс дәл рекурренттік сұлбамен генерацияланады

$$x_{k+1} = x_k\, e^{-\Delta t_k/\tau} + \sigma_{\rm DRW}\sqrt{1 - e^{-2\Delta t_k/\tau}}\,\xi_k, \qquad (8)$$
$$\xi_k \sim \mathcal{N}(0,1),$$

екі параметрмен: стационарлық амплитуда $\sigma_{\rm DRW}$ және релаксация уақыты $\tau_{\rm DRW}$.

Модель тұтылуларды әдейі қамтымайды: қолда бар деректер бойынша белгілі FS CMa қос жүйелері — кең жүйелер ($P \approx 25$–130 тәулік [4, 7]), олар үшін тұтылу конфигурациясының ықтималдығы аз; оның үстіне қолайлы геометрия жағдайында серіктің шаң қабығы жұлдыздың алдынан өткенде туындайтын ықтимал әлсіреулерді модельге оңай қосуға болады (сәйкес опция бағдарламалық кодта іске асырылған). Жалпыланған модельдің тірек параметрлерінің мәндері 1-кестеде келтірілген: олар FS CMa типтес расталған қос жүйелердің жарияланған сипаттамалары бойынша таңдалған – MWC 728 периоды ($P \approx 27{,}5$ тәулік [7]) мен AS 386 периоды ($P \approx 131{,}3$ тәулік [4]), басты компоненттердің тән массалары $M_1 \approx 6$–$7\ M_\odot$ [4, 7] және топ прототипінің бақыланатын тұрақсыз өзгергіштік амплитудалары [3]. Тірек конфигурация үшін ($P = 27{,}5$ тәулік, $M_1 = 6\ M_\odot$, $q = 0{,}35$) үлкен жарты ось $a = 0{,}358$ а.б. $= 77\ R_\odot$ құрайды, демек $R_1/a \approx 0{,}065$ және эллипсоидтық құраушының амплитудасы аз: $A_{\rm ell} \approx 1{,}1\cdot10^{-4}$; бұл ретте басты компоненттің сәулелік жылдамдығының жарты амплитудасы $K_1 \approx 34$ км/с, бұл FS CMa спектроскопиялық орбиталары үшін бақыланатын мәндермен шама реті бойынша үйлеседі [4].

1-кесте. FS CMa типтес қос жүйенің жалпыланған моделінің параметрлері

Параметр	Символ	Тірек мәні	Тор диапазоны
Басты компоненттің массасы, $M_\odot$	M_1	6,0	-
Басты компоненттің радиусы, $R_\odot$	R_1	5,0	-
Орбиталық период, тәулік	P	27,5	3–131
Массалар қатынасы	q	0,35	0,05–0,60
Эксцентриситет	e	0,20	0–0,60
Еңкею, град	i	65	15–90
Периастр аргументі, град	ω	60	0–360
Шағылысу эффектісінің амплитудасы	$A_{\rm refl}$	0,004	-
Периастрлық жарқыраудың амплитудасы	$A_{\rm p}$	0,020	0,002–0,050
Тыныстық модуляция көрсеткіші	γ	3	-
DRW-құраушының амплитудасы, ммаг	$\sigma_{\rm DRW}$	6	3–6
DRW релаксация уақыты, тәулік	$\tau_{\rm DRW}$	100	-
Жерүсті фотометриясының шуылы, ммаг	$\sigma_{\rm g}$	8	-

Параметр	Символ	Тірек мәні	Тор диапазоны
Ғарыштық фотометрияның шуылы, ммаг	σ_{T}	1	-

Синтетикалық бақылаулар және талдау әдістері

Тұжырымдардың нақтылығы үшін синтетикалық жарқырау қисықтары екі типті уақыт торында генерацияланды. Біріншісі ASAS-SN типтес жерүсті фотометриялық мониторингін имитациялайды [10]: жылына ұзақтығы 240 тәулік көріну маусымы ішінде түніне бір өлшеу, ауа райына байланысты түндердің 40%-ының кездейсоқ жоғалуы, қатардың жалпы ұзақтығы 1500 тәулік (бұл дәлдігі σ_{g} = 8 ммаг (миллижұлдыздық шама) болатын N = 583 өлшеу береді). Екіншісі TESS типтес ғарыштық фотометрияны имитациялайды [11]: әрқайсысының ортасында тәуліктік үзілісі бар, қадамы 30 мин болатын 27 тәуліктік екі «сектор» (дәлдігі σ_{T} = 1 ммаг болатын N = 2496 нүкте). (1)–(7) детерминацияланған модельге (8) DRW-құраушысы мен ақ шуыл қосылды. Тірек модельдің толық синтетикалық жарқырау қисығының мысалы 1-суретте келтірілген.

Периодтылықтарды іздеу «қалқымалы ортасы» бар жалпыланған Ломб–Скаргл периодограммасымен (GLS) орындалды [14-17]; оның f жиілігіндегі қуаты салмақталған тригонометриялық қосындылар арқылы есептеледі:

$$p(f) = \frac{SS \cdot YC^2 + CC \cdot YS^2 - 2\,CS \cdot YC \cdot YS}{YY(CC \cdot SS - CS^2)}. \quad (9)$$

Қосындылардың белгіленуі [16] жұмысына сәйкес келеді. Жалған дабыл деңгейлері (FAP) бутстрэп-әдіспен бағаланды: жарқырау мәндерінің 300 кездейсоқ алмастыруы когерентті сигналды бұзады, ал алмастыру периодограммаларының қуат максимумдарының үлестірімі FAP = 1% және 0,1% эмпирикалық табалдырықтарын береді. Табылған периодтар фазалық дисперсияны минимизациялау (PDM) әдісімен тәуелсіз тексерілді [18]; оның статистикасы

$$\Theta(P) = \frac{s^2(P)}{\sigma^2}, \quad s^2(P) = \frac{\sum_j (n_j - 1)\, s_j^2}{\sum_j (n_j - 1)}, \quad (10)$$

фазалық бинлер ішіндегі біріктірілген $s^2(P)$ дисперсиясын (10 бин пайдаланылды) қатардың толық σ^2 дисперсиясымен салыстырады: нақты периодқа $\Theta(P)$ функциясының терең минимумы сәйкес келеді. Сигналдың уақыт бойынша тұрақтылығы терезелік GLS-периодограммамен бақыланды (терезе 300 тәулік, қадам 20 тәулік): когерентті орбиталық сигнал уақыт-жиілік картасында үзіліссіз көлденең жоталы құрылым түзеді, ал шуылдық тектегі шыңдар стационар емес. Сигнал пішіні синусоидалыдан айтарлықтай ауытқыған жағдайда (эксцентрлік орбиталар) қуаттың едәуір бөлігі негізгі жиіліктің гармоникаларына кететінін ескереміз, сондықтан GLS фазалық қисықтың кез келген пішініне сезімтал PDM әдісімен толықтырылды [18].

Орбиталық сигналдың анықталғыштығы Монте-Карло әдісімен бағаланды. Параметрлер торының әрбір нүктесі үшін шуылдың (DRW + ақ) 12 тәуелсіз реализациясы генерацияланды. Күтілетін шыңның айналасындағы тар жиілік жолағында (±8–10%) GLS-қуаттың максимумы сол уақыт торымен таза шуылдық процестің 300 реализациясы бойынша тұрғызылған табалдырықтан (максимумдар үлестірімінің 99-процентилі) асқан жағдайда сигнал анықталды деп саналды. Мұндай табалдырық төмен жиіліктерде қуатты асыра көрсететін шуылдың «қызыл» сипатын дұрыс ескереді — тек ақ құраушыны ғана сақтайтын алмастыру тестінен айырмашылығы осында.

Синтетикалық «бақыланатын» жарқырау қисығы бойынша параметрлерді қалпына келтіру байестік әдіспен орындалды. θ = (P, t_{p}, e, ω, i, q, A_{p}, m_0, ln σ_{jit}) параметрлер векторы гаусстық шындыққа ұқсастық функциясы бар апостериорлық үлестірім бойынша бағаланды

$$\ln\mathcal{L}(\vec{\theta}) = -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N}\left[\frac{\left(m_k - m_{\mathrm{mod}}(t_k;\vec{\theta})\right)^2}{s_k^2} + \ln(2\pi s_k^2)\right], \quad (11)$$

$$s_k^2 = \sigma_k^2 + \sigma_{\mathrm{jit}}^2,$$

мұндағы қосымша «джиттер» σ_{jit} модельде ескерілмеген стохастикалық өзгергіштікті (DRW) сіңіреді. Априорлық үлестірімдер физикалық рұқсат етілген шектерде біркелкі деп қабылданды (атап айтқанда, периодограммалық талдау нәтижесі бойынша $P \in [27; 28]$ тәулік, $e \in [0; 0{,}7]$, $i \in [10°; 90°]$, $q \in [0{,}05; 1]$). Апостериорлық үлестірімнен таңдама Метрополис–Гастингс алгоритмімен құрылды [19-21]: әрқайсысы 150 000 қадамнан тұратын 4 тәуелсіз тізбек, алғашқы 50 000 қадам алынып тасталды, сиретү – әрбір 15-ші қадам; жинақталу Гельман–Рубин критерийімен бақыланды [22, 23] (барлық параметрлер үшін $\hat{R} \leq 1{,}01$). «GLS бойынша период → шындыққа ұқсастықты жергілікті

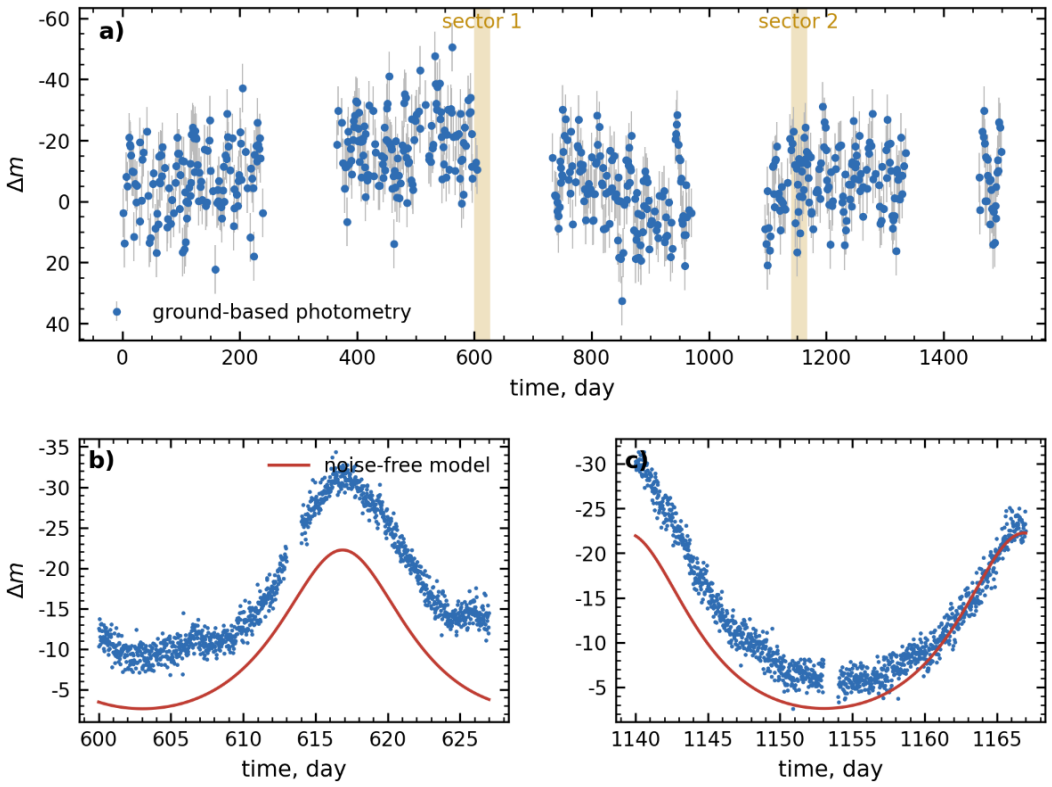
оңтайландыру» толық конвейерінің жұмысқа қабілеттілігі 1-кестеде көрсетілген параметрлер диапазондарынан алынған 24 кездейсоқ жүйе ансамблінде қосымша тексерілді.

Нәтижелер

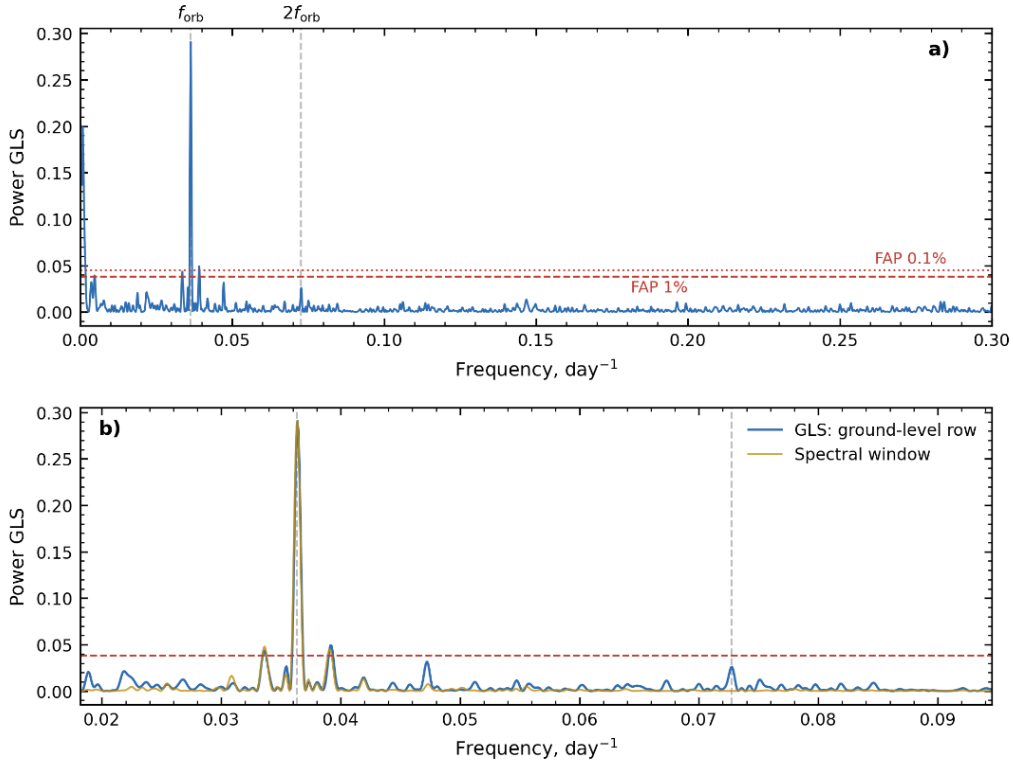
Тірек модельдің синтетикалық «бақылаулары» (1-сурет) жоғарыда сипатталған әдістермен талданды. Жерүсті қатарының GLS-периодограммасы (2-сурет) $f_{\rm orb} = 1/P$ орбиталық жиілігінде басым шыңды көрсетеді: табылған период $P_{\rm GLS}$ = 27,481 тәулік нақты мәннен (27,5 тәулік) 0,07%-ға ерекшеленеді, ал шың қуаты (0,291) FAP = 1% бутстрэп-табалдырығынан (0,038) шамамен бір ретке асып түседі. Төмен жиіліктердегі ($f < 0{,}01$ тәулік$^{-1}$) елеулі қуат толығымен DRW-құраушысымен байланысты – бұл FS CMa нысандарының «қызыл» шуылының жалған ұзақ периодты сигналдарды имитациялай алатынының көрнекі мысалы. Шыңның құрылымы және оның алиастары (±1 жыл$^{-1}$) жерүсті қатарының спектрлік терезесімен толық түсіндіріледі (2b-сурет).

Жерүсті қатарын табылған периодпен түйіндеу (3a-сурет) периастрлық жарқыраудың фазалық қисығын сенімді жаңғыртады; фазалық бинлер бойынша орташа мәндер қателіктер шегінде нақты модельге сәйкес келеді. $P/2$ периодымен түйіндеу (3b-сурет) когерентті құрылым түзбейді, бұл шыңды гармоника деп түсіндіру мүмкіндігін жоққа шығарады. Тәуелсіз PDM статистикасы (3c-сурет) $P_{\rm PDM}$ = 27,490 тәулікте өткір минимум береді, бұл GLS нәтижесімен 0,03% шегінде үйлеседі.

Анықталғыштықтың жүйе параметрлеріне жүйелі тәуелділігі 4-суретте берілген. 4a-суретте орбиталық сигналдардың ішіндегі «ең геометриялық» – ғарыштық фотометриядағы эллипсоидтық өзгергіштікке сәйкес келеді (27 тәуліктен екі сектор, $e = 0$, $i = 65°$ кезіндегі таза эллипсоидтық сигнал). Сенімді анықталу шекарасы (анықталу үлесі 0,9) $q = 0{,}05$ кезінде $P \approx 6$ тәулік бойымен өтеді және $q \gtrsim 0{,}4$ кезінде $P \approx$ 15–16 тәулікке дейін көтеріледі: $A_{\rm ell} \propto q(R_1/a)^3 \propto qP^{-2}$ амплитудасы циклдегі нүктелер санының өсуінен гөрі периодпен тезірек кемиді. Белгілі FS CMa қос жүйелеріне тән мәндерде ($P \gtrsim 25$ тәулік) эллипсоидтық сигнал миллижұлдыздық шама дәлдігіндегі ғарыштық фотометрияға да қолжетімсіз – оны 27,5 тәуліктік жүйеде анықтауға тырысу біздің торымызда $q \leq 0{,}6$ болатын кез келген мәнде нөлдік анықталу үлесін береді.

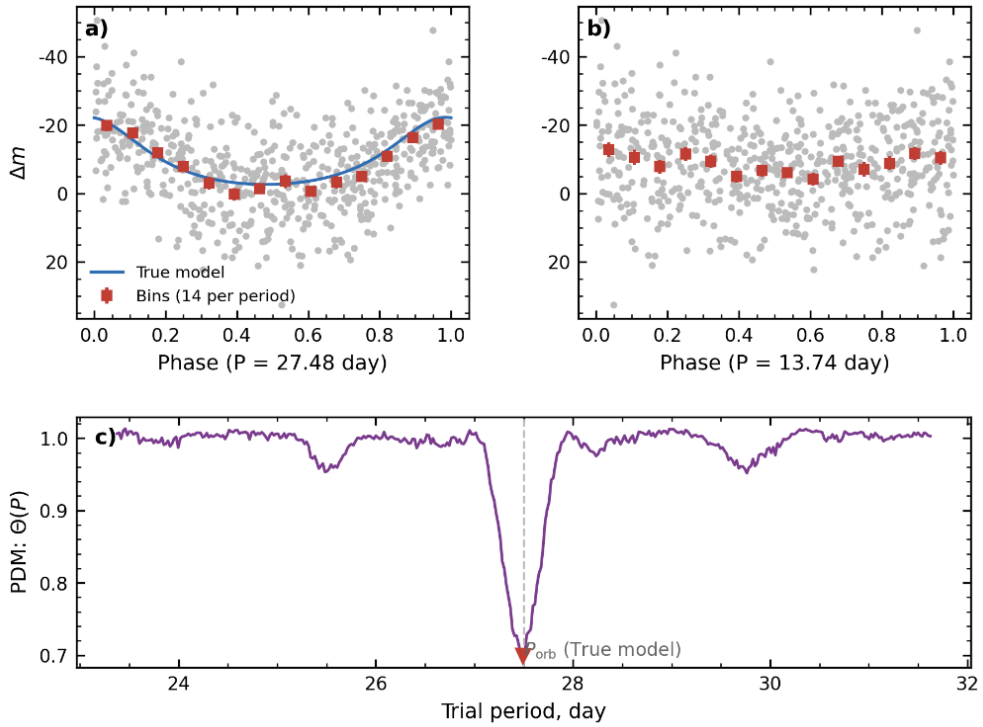


1-сурет – Тірек модельдің синтетикалық «бақылаулары»: a) ұзақтығы 1500 тәулік жерүсті қатары (583 өлшеу, σ_g = 8 ммаг); сары жолақтар — ғарыштық фотометрия аралықтары; b), c) ғарыштық фотометрияның екі «секторындағы» жарқырау қисықтары (қадам 30 мин, σ_T = 1 ммаг) шуылсыз модельмен (қызыл сызық) салыстырғанда.



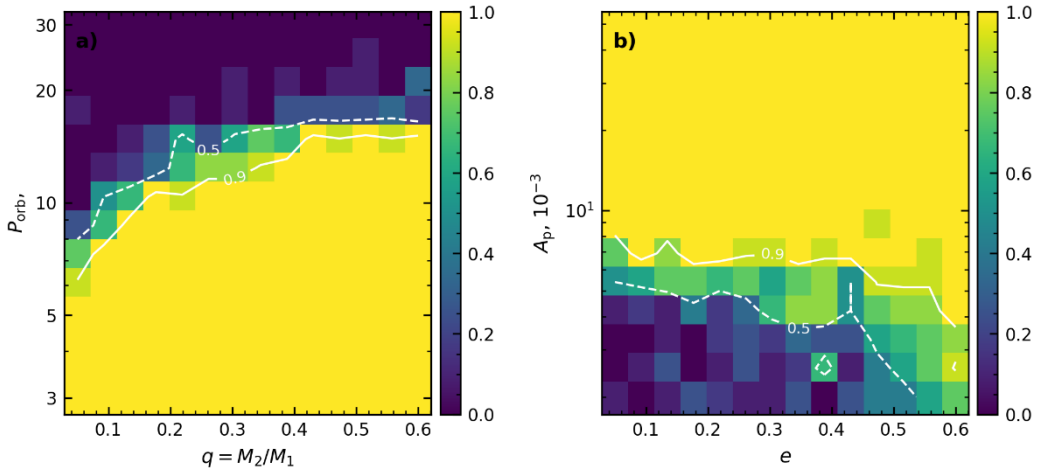
2-сурет. a) тірек модельдің жерүсті қатарының GLS-периодограммасы; штрихталған көлденең сызықтар. FAP = 1% және 0,1% бутстрэп-деңгейлері; тік сызықтар – орбиталық жиілік және оның

екінші гармоникасы. b) орбиталық жиіліктің маңы. Сары сызық – қатардың спектрлік терезесі (масштабталған), ол басты шыңның жылдық алиастарын түсіндіреді.



3-сурет. a) жерүсті қатарының табылған 27,48 тәулік периодымен түйінделуі (сұр нүктелер – өлшеулер, қызыл шаршылар – 14 фазалық бин бойынша орташа мәндер, көк сызық – нақты модель); b) жарты периодпен түйіндеу (когерентті құрылым жоқ); c) PDM статистикасы: өткір минимум нақты периодты көрсетеді (штрихталған сызық).

4b-суретте басты төмен жиілікті сигналға — жерүсті қатарындағы (1500 тәулік, σ_g = 8 ммаг, σ_{DRW} = 6 ммаг) периастрлық жарқырауға сәйкес келеді. Амплитуда бойынша анықталу табалдырығы $A_p \approx (4–6)\cdot10^{-3}$ ағын (4–6 ммаг) құрайды және эксцентриситеттің өсуімен әлсіз ғана төмендейді: e үлкен болғанда сигнал фазалардың тар аралығына жинақталғанымен (бұл оның синусоидалы еместігін арттырып, қуатты гармоникаларға «жаяды»), негізгі гармоника зерттелген $e \leq 0{,}6$ диапазонының бүкіл аумағында басым болып қала береді. Практикалық тұжырым: стандартты дәлдіктегі төртжылдық жерүсті мониторингі жарқырағыштыққа қосатын үлесі небәрі ≈0,5% болатын орбиталық масса алмасуды анықтай алады — бұл FS CMa нысандарының тұрақсыз өзгергіштігінің тән амплитудасынан бір ретке аз.



4-сурет. Орбиталық сигналдың анықталу карталары (шуылдың 12 реализациясы бойынша анықталу үлесі; ақ контурлар — 0,5 және 0,9 деңгейлері). a) ғарыштық фотометриядағы эллипсоидтық өзгергіштік ($2f_{orb}$ жиілігі (q, P) жазықтығында; b) жерүсті қатарындағы периастрлық жарқырау f_{orb} жиілігі (e, A_p) жазықтығында.

Жоғарыда сипатталған сұлба бойынша тірек модельдің жерүсті қатары үшін тұрғызылған апостериорлық үлестірімдердің нәтижелері 2-кестеде келтірілген. Барлық тізбектер жинақталған ($\hat{R} \leq 1{,}01$). Период пен периастрдан өту мезеті жоғары дәлдікпен қалпына келтіріледі (P = 27,478 ± 0,016 тәулік, t_p = 12,63 ± 0,68 тәулік), периастрлық жарқыраудың амплитудасы да сенімді бағаланады (A_p = (17,6 ± 2,8)·10^{-3}). Эксцентриситет $\sigma_e \approx 0{,}04$ дәлдікпен қалпына келтіріледі, алайда ескерілмеген қызыл шуыл салдарынан сәл төмендетіліп бағаланады (нақты 0,200 мәніне қарсы $e = 0{,}157^{+0{,}039}_{-0{,}037}$). Периастр аргументі ω, еңкею i және массалар қатынасы q фотометриялық деректермен іс жүзінде шектелмейді: олардың апостериорлық үлестірімдері априорлық үлестірімге жақын, ал қателіктері параметрдің өз мәнімен шамалас. Джиттер параметрі σ_{jit} = 6,9 ± 0,5 ммаг модельге енгізілген DRW-құраушының амплитудасына жақын мән береді, яғни ол ескерілмеген стохастикалық өзгергіштікті дұрыс сіңіреді. 1-кестеде көрсетілген диапазондардан алынған 24 кездейсоқ жүйе ансамблінде жүргізілген валидация периодтың медианалық қатесі 0,08%, ал эксцентриситеттің орташа квадраттық қатесі 0,05 екенін көрсетті.

2-кесте. Тірек модельдің жерүсті қатары бойынша параметрлерді MCMC әдісімен қалпына келтіру нәтижелері

Параметр	Нақты мәні	MCMC бағасы	$\hat{R}$
P, тәулік	27,500	27,478 ± 0,016	1,002
t_p, тәулік	12,30	12,63 ± 0,68	1,002
e	0,200	$0{,}157^{+0{,}039}_{-0{,}037}$	1,001
ω, град	60	шектелмеген	1,007
i, град	65	шектелмеген (49 ± 27)	1,002
q	0,35	шектелмеген (0,52 ± 0,32)	1,001
A_p, 10^{-3}	20,0	17,6 ± 2,8	1,005
σ_{jit}, ммаг	6 (DRW)	6,9 ± 0,5	1,000

Талқылау

Алынған анықталу карталары нақты нысандар үшін күтілетін нәтижелерді тұжырымдауға мүмкіндік береді. MWC 728 типтес параметрлері бар жүйелер үшін ($P \approx 27{,}5$ тәулік [7]) орбиталық фотометриялық өзгергіштік негізінен периастрлық жарқырау және шағылысу эффектісі арқылы көрінуі тиіс; аккрециялық жарқырағыштықтың үлесі толық ағынның ≳0,5%-ын құраған жағдайда сигнал жерүсті шолуларына да қолжетімді, сондықтан оны ASAS-SN мұрағаттық қатарларынан іздеу орынды болып көрінеді. AS 386 типтес кең жүйелер үшін ($P \approx 131$ тәулік, $a \approx$ 1,1 а.б. [4]) үш механизмнің үшеуі де әлсіреген (эллипсоидтық — қысқа периодты жағдаймен салыстырғанда төрт ретке), сондықтан мұндай нысандарда когерентті орбиталық фотометрия-

лық модуляцияның болмауы олардың қосарлығына қайшы келмейді. Бұл тұжырым FS CMa нысандарының фотометриялық өзгергіштігі негізінен тұрақсыз сипатта болатыны туралы жалпы бақылау фактісімен үйлеседі [2, 3]: біздің модель шеңберінде когерентті сигнал DRW-құраушысымен салыстырғанда әлдеқайда әлсіз, ал оны бөліп алу үшін ондаған орбиталық периодты қамтитын ұзақ қатарлар қажет.

Сандық эксперимент фотометрияның ақпараттылық иерархиясын айқын көрсетеді: $P \rightarrow t_{\rm p}$, $A_{\rm p} \rightarrow e \rightarrow (\omega, i, q)$. Орбитаның геометриясы мен массалар қатынасы қосымша деректерсіз қолжетімсіз болып қалады. Азғындалуды ішінара болса да жоюдың қатарларды біріктіру арқылы мүмкін екенін атап өтеміз: қысқа периодты жүйелердің ғарыштық фотометриясы $q\ \sin^2 i$ шамасына сезімтал эллипсоидтық сигналды қосады (4-сурет, а), ал фотометрия мен сәулелік жылдамдықтарды бірлесіп талдау есепті толық тұйықтайды - периастрлық жарқырау $t_{\rm p}$ мен e шамаларын спектроскопиядан тәуелсіз бекітіп, орбиталық шешім параметрлерінің арасындағы корреляцияларды азайтады.

Бұл FS CMa зерттеулерінде қабылданған спектроскопияны, фотометрияны және статистикалық әдістерді біріктіру стратегиясының өнімділігін растайды [4, 5, 7, 9].

Пайдаланылған модель – физикалық негізделген минималды параметрлеу, сондықтан оның бірқатар шектеулері бар:

1) Периастрлық жарқырау көрсеткіші γ тіркелген (6) феноменологиялық функциясымен сипатталған; аккрециялық жауаптың компоненттер арасындағы қашықтыққа нақты тәуелділігі масса алмасудың газдинамикасымен анықталады және фаза бойынша асимметриялы болуы мүмкін (жауаптың кешігуі), бұл $t_{\rm p}$ мен ω бағаларына ығысу енгізеді.

2) DRW – тұрақсыз өзгергіштіктің оңайлатылған сипаттамасы. Нақты FS CMa нысандары одан да күрделі құбылыстар көрсетеді (ұзақ мерзімді трендтер, қабықпен тұтылу типтес шаңдық әлсіреу эпизодтары), олар периодтылықтарды бүркемелеуі не имитациялауы мүмкін; MCMC-талдауда ескерілмеген қызыл шуыл джиттермен сіңірілді, бұл қателіктерді консервативті түрде кеңейтеді, алайда ықтимал ығысуларды жоймайды (жоғарыда келтірілген e мәнінің төмендетіліп бағалануы). Қатаңырақ шешім DRW-ядросы бар гаусстық процестік шындыққа ұқсастық функциясы болар еді, бұл келесі қадам ретінде белгіленді.

3) Біз жұлдыз маңы дискісінің орбиталық жиіліктегі меншікті өзгергіштігін (спиральды тығыздық толқындары, дискінің қоректенуінің модуляциясы) ескермедік; ол орбиталық сигналды күшейтуі де, бұрмалауы да мүмкін, ал оны есепке алу газдинамикалық модельдеуді талап етеді.

4) Кең жүйелер үшін сирек кездесетін тұтылу конфигурациялары мұнда зерттелмеді, дегенмен код оларды қосуға мүмкіндік береді.

5) Анықталу табалдырықтары туралы тұжырымдар қабылданған қатар ұзақтығына, дәлдікке және бақылаулардың жоғалу үлесіне байланысты; басқа шолулар үшін 4-суреттегі карталарды қайта есептеу қажет, ал ашық код болғандықтан бұл қиындық тудырмайды.

Қорытынды

FS CMa типтес қос жүйенің фотометриялық өзгергіштігінің қайталанымды сандық моделі құрылды; ол кеплерлік орбиталық геометрияны, жарқыраудың орбиталық модуляциясының үш детерминацияланған механизмін (эллипсоидтық, шағылысулық, периастрлық-аккрециялық) және осы класс нысандарына тән стохастикалық DRW-құраушыны біріктіреді. Жұмыстың негізгі нәтижелері мынадай.

1. Расталған FS CMa қос жүйелеріне тән кең орбиталар үшін ($P \gtrsim 25$ тәулік) басым орбиталық фотометриялық сигнал - периастрлық жарқырау, эллипсоидтық өзгергіштік (амплитудасы $\approx 10^{-4}$) ғарыштық фотометрияға да қолжетімсіз және тек $P \lesssim$ 6–16 тәулік болғанда ғана (q-ға байланысты) анықталады.

2. Стандартты дәлдігі 8 ммаг болатын ұзақтығы ≈4 жылдық жерүсті мониторингі $\sigma_{\rm DRW}$ = 6 ммаг қызыл шуылдың болуына қарамастан амплитудасы $\gtrsim (4–6)\cdot 10^{-3}$ ағын болатын периастрлық жарқырауды эксцентриситетке іс жүзінде тәуелсіз түрде сенімді (анықталу үлесі >0,9) айқындауды қамтамасыз етеді. Мәнділікті дұрыс бағалау қызыл құраушыны ескеретін шуылдық Монте-Карло реализациялары бойынша тұрғызылған табалдырықтарды талап етеді.

3. Кері есеп фотометриямен тек ішінара шешіледі: период (дәлдігі $\approx 10^{-3}$), периастр мезеті, жарқырау амплитудасы және эксцентриситет ($\sigma_e \approx$ 0,04–0,05) сенімді қалпына келтіріледі (MCMC-талдаумен және 24 жүйе ансамблінде валидациямен расталған), ал периастр аргументі, еңкею және массалар қатынасы периастрлық типтегі фотометриямен шектелмейді. Оларды анықтау үшін сәулелік жылдамдықтар

спектроскопиясы немесе қысқа периодтар үшін ғарыштық фотометрия қажет.

4. FS CMa нысандарының қосарлығын іздеуге қатысты практикалық ұсыныс: жерүсті шолуларының көпжылдық мұрағаттық қатарларын жүйелі периодограммалық талдау (GLS + PDM + терезелік талдау + шуылдық Монте-Карло табалдырықтары) жарқырағыштыққа қосатын үлесі ≈0,5%-дан басталатын орбиталық масса алмасуға сезімтал, ал кең жүйелер үшін мұндай іздеудің теріс нәтижесі қосарлықты жоққа шығармайды.

Әдебиет

1. H.J.G.L.M. Lamers, F.-J. Zickgraf, D. de Winter, L. Houziaux, and J. Zorec, An improved classification of B[e]-type stars, *Astron. Astrophys.* **340**, 117 (1998).

2. A.S. Miroshnichenko, Toward understanding the B[e] phenomenon. I. Definition of the galactic FS CMa stars, *Astrophys. J.* **667**, 497 (2007). https://doi.org/10.1086/520798

3. D. de Winter and M.E. van den Ancker, The peculiar B[e] star HD 45677. I. Photometric observations, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **121**, 275 (1997).

4. S.A. Khokhlov et al., Toward understanding the B[e] phenomenon. VII. AS 386, a single-lined binary with a candidate black hole component, *Astrophys. J.* **856**, 158 (2018). https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab49d

5. A.S. Nodyarov et al., Toward understanding the B[e] phenomenon. IX. Nature and binarity of MWC 645, *Astrophys. J.* **936**, 129 (2022). https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac87a1

6. A.F. Torres, M.A. Areas, M.Kraus, L.V. Mercanti, T.Eenmae, New insight into the FS CMa system MWC 645 from near-infrared and optical spectroscopy, *Galaxies* **11** (3), 72 (2023). https://doi.org/10.3390/galaxies11030072

7. N.L. Vaidman, S.A. Khokhlov, and A.T. Agishev, Unveiling the evolution of MWC 728: non-conservative mass transfer in an FS CMa binary, *Galaxies* **13** (4), 78 (2025). https://doi.org/10.3390/galaxies13040078

8. D. Korčáková, N. Dvořáková, I. Bermejo Lozano, G.A. Wade, A.M. Basurto, P. Kroupa, R.O. Chametla, C.P. Folsom, O. Juhas, Intermediate-mass mergers: a new scenario for several FS CMa stars, *Galaxies* **13** (3), 46 (2025). https://doi.org/10.3390/galaxies13030046

9. Z. Zhanabaev, A. Akniyazova, and Y. Ashimov, Information–entropy analysis of stellar evolutionary stages with application to FS CMa objects, *Entropy* **27** (11), 1106 (2025). https://doi.org/10.3390/e27111106

10. C.S. Kochanek et al., The All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) light curve server v1.0, *Publ. Astron. Soc. Pac.* **129**, 104502 (2017). https://doi.org/10.1088/1538-3873/aa80d9

11. G.R. Ricker et al., Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* **1**, 014003 (2015). https://doi.org/10.1117/1.JATIS.1.1.014003

12. S.L. Morris and S.A. Naftilan, The ellipsoidal variable stars, *Astrophys. J.* **419**, 344 (1993).

13. B.C. Kelly, J. Bechtold, and A. Siemiginowska, Are the variations in quasar optical flux driven by thermal fluctuations? *Astrophys. J.* **698**, 895 (2009). https://doi.org/10.1088/0004-637X/698/1/895

14. N.R. Lomb, Least-squares frequency analysis of unequally spaced data, *Astrophys. Space Sci.* **39**, 447 (1976). https://doi.org/10.1007/BF00648343

15. J.D. Scargle, Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, *Astrophys. J.* **263**, 835 (1982). https://doi.org/10.1086/160554

16. M. Zechmeister and M. Kürster, The generalised Lomb–Scargle periodogram. A new formalism for the floating-mean and Keplerian periodograms, *Astron. Astrophys.* **496**, 577 (2009). https://doi.org/10.1051/0004-6361:200811296

17. Ye.K. Ashimov, Mathematical Modelling of the Lomb–Scargle Method in Astrophysics, *in Trends in Mathematics*, 2 (2024)https://doi.org/10.1007/978-3-031-42539-4_29

18. R.F. Stellingwerf, Period determination using phase dispersion minimization, *Astrophys. J.* **224**, 953 (1978). https://doi.org/10.1086/156444

19. N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, and E. Teller, Equation of state calculations by fast computing machines, *J. Chem. Phys.* **21**, 1087 (1953). https://doi.org/10.1063/1.1699114

20. W.K. Hastings, Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications, *Biometrika* **57**, 97 (1970). https://doi.org/10.1093/biomet/57.1.97

21. N.L. Vaidman, Sh.T. Nurmakhametova, A.S. Miroshnichenko, S.A. Khokhlov, A.T. Agishev, A.A. Khokhlov, Y.K. Ashimov, B.S. Yermekbayev, Determination of Orbital Parameters of Binary Star Systems Using the MCMC Method, *Galaxies* **13**, 101 (2025).

22. A.Zh. Akniyazova, A.S. Miroshnichenko, Z.Zh. Zhanabaev, Comprehensive analysis of spectral and photometric characteristics of the B[E] phenomenon object MWC 342 over a 40-year observation period*, Recent Contributions to Physics* **2** (93), 21 (2025). (*in Russ*.) https://doi.org/10.26577/RCPh20259323

23. A. Gelman, and D.B. Rubin, Inference from iterative simulation using multiple sequences, *Stat. Sci.* **7**, 457 (1992). https://doi.org/10.1214/ss/1177011136

Автор туралы мәлімет:

Ескендір Ашимов – PhD студенті, электроника және астрофизика кафедрасының аға оқытушысы, физика-техникалық факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: yeskendyr@gmail.com).

Information about author:
Yeskendir Ashimov – PhD student, Senior Lecturer of Electronics and Astrophysics Department, Faculty of Physics and Technics, Farabi University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: yeskendyr@gmail.com).

Сведения об авторе:
Ескендир Ашимов – докторант PhD, старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики, физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, e-mail: yeskendyr@gmail.com).

***Мақала тарихы**: түсті: 22 мауысым 2026; қабылданды: 03 қазан 2026.*
***Article history:** received: 22 June 2026; accepted: 03 October 2026.*
***История статьи:** поступила: 22 июня 2026; принята: 03 октября 2026.*