

УДК 524.35-337

## ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ И МАГНИТНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ Ар-ЗВЕЗДЫ GY And

© 2014 Н. В. Метлова<sup>1\*</sup>, В. Д. Бычков<sup>2</sup>, Л. В. Бычкова<sup>2</sup>, Ю. Мадей<sup>3</sup><sup>1</sup>Крымская лаборатория Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Научный, 298409 Россия<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>3</sup>Астрономическая обсерватория Варшавского университета, Варшава, 00-478 Польша

Поступила в редакцию 13 февраля 2014 года; принята в печать 16 апреля 2014 года

В данном исследовании представлены результаты фотометрического и магнитного мониторинга известной долгопериодической Ар-звезды GY And. Поводом для исследования послужила необычная «вековая» переменность показателя цвета  $B - V$ . Фотометрический мониторинг осуществлялся на 60-см рефлекторе Крымской лаборатории МГУ, на котором в течение 2011–2014 гг. было получено 420 оценок блеска в широкополосных фильтрах  $U$ ,  $B$  и  $V$  системы Джонсона. Магнитный мониторинг проводился на 1-м телескопе САО РАН. Продолжительность фотометрических наблюдений — около 54 лет, а длительность магнитного мониторинга составляет 64 года. В результате уточнен период и параметры переменности магнитного поля и фотометрическое поведение. Показано, что необычная «вековая» переменность цвета объясняется скважностью наблюдений.

Ключевые слова: *звёзды: химически пекулярные — звёзды: магнитное поле — звёзды: индивидуальные: GY And*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

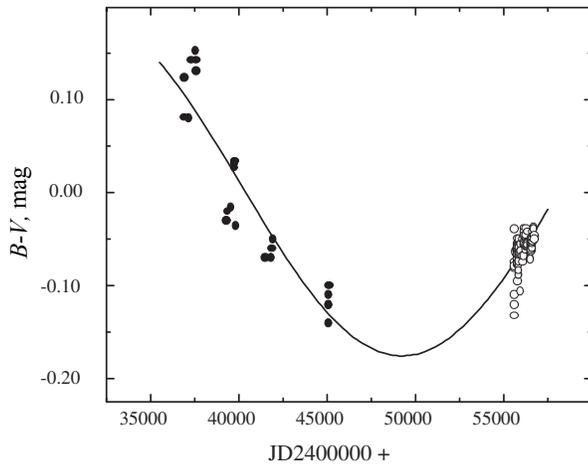
GY And (HD 9996, HR 465) — спектрально-двойная система, в которой главным компонентом является магнитная Ар-звезда спектрального типа B9 CrEuSi. Из работы Гриффин [1] известно, что орбитальный период системы составляет  $P_{\text{orb}} = 272.833 \pm 0.006$  дня, т.е. компоненты достаточно удалены друг от друга. Орбиты компонент эллиптически, эксцентриситет составляет  $e = 0.504 \pm 0.004$  с моментом прохождения периастра  $T_{\text{per}} = \text{JD } 2448039.18 \pm 0.30$ . Более ранние определения элементов орбиты приводятся в работе [2]. Магнитное поле главного компонента Ар-звезды впервые измерено Бэбкоком [3] и затем рядом авторов. Последнее наиболее детальное исследование было проведено Бычковым и др. [4]. В этом исследовании показано, что период магнитной переменности составляет  $P_{\text{mag}} = 7961.8 \pm 22$  дня = 21.8 года.

Периодическая переменность блеска Ар-звезд и переменность их продольного магнитного поля связаны с периодом вращения звезды. Переменность блеска и цвета звезды объясняется температурными неоднородностями на поверхности звезды, ее пятнистой структурой, а переменность

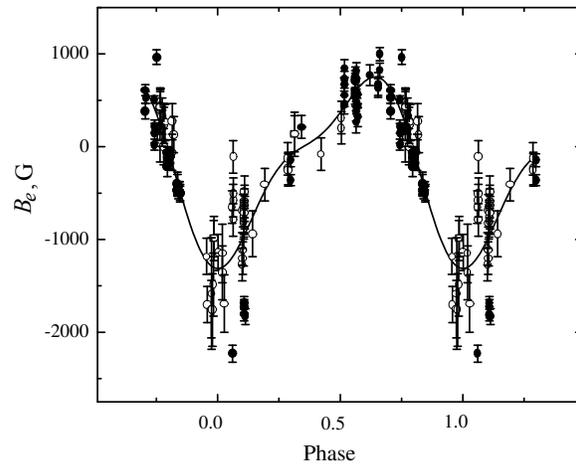
магнитного поля — тем, что оно «вморожено» в атмосферу звезды и вращается вместе с ней: широко известная модель наклонного ротатора Стиббса–Престона [5, 6]. В соответствии с этой моделью следует ожидать, что блеск и цвет данной Ар-звезды будут меняться с периодом 21.8 года, что хорошо видно из литературных данных оценок блеска за 1962–1993 гг., собранных в работе [4]. Вместе с тем, используя полученные из литературных источников фотометрические данные, авторы заподозрили, что показатель цвета  $B - V$  широкополосной фотометрической системы Джонсона плавно меняется с периодом порядка 87 лет.

На рис. 1 фотометрические данные, полученные из литературных источников, изображены заполненными кружками и достаточно хорошо ложатся на теоретическую кривую, описывающую переменность с этим периодом. Но это вступает в противоречие с принятой моделью: все параметры (магнитное поле, блеск и цвета), которые меняются в течении периода вращения, должны повторяться с периодом. А изменения показателя цвета  $B - V$  не повторялись (см. рис. 1). Для решения этого противоречия и уточнения параметров фотометрической переменности в январе 2011 г. были начаты систематические наблюдения этой звезды на 60-см телескопе Zeiss-600 Крымской лаборатории

\*E-mail: metlova@sai.crimea.ua



**Рис. 1.** Заполненные кружки — литературные данные для показателя цвета  $B - V$ , светлые кружки — данные, полученные в настоящем исследовании. Кривая — предполагаемая долгопериодическая переменность показателя цвета  $B - V$  с периодом около 87 лет.



**Рис. 2.** Переменность магнитного поля с периодом  $P_{\text{rot}} = 7936.5 \pm 22$  дня. Светлые кружки — предыдущие измерения, заполненные кружки — измерения, полученные на 1-м телескопе САО РАН.

Московского университета (п. Научный, Крым) в широкополосной системе  $UBV$  Джонсона с целью изучения переменности блеска и цвета. Одна из основных трудностей фотометрического мониторинга такой яркой звезды, как GY And ( $m_V \approx 6.4$ ), заключается в том, что существующие автоматизированные системы фотометрического мониторинга (ASAS3, SuperWASP, TASS и др.) рассчитаны на более слабые звездные величины (как правило, слабее  $8^m$ ) и не дают надежных фотометрических оценок из-за перенасыщения. Попытки поиска более короткого периода фотометрической переменности не были успешны по той же причине [7].

## 2. МАГНИТНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ. УТОЧНЕНИЕ ПЕРИОДА

GY And имеет значительную магнитную и фотометрическую переменность. К сожалению, фо-

**Таблица 1.** Результаты измерения величины продольного магнитного поля  $B_e$  с оценкой точности

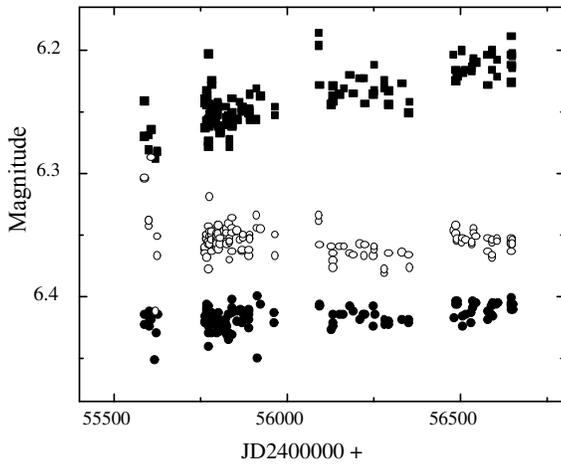
JD 2400000.+	$B_e$	$\sigma_{B_e}$	JD 2400000.+	$B_e$	$\sigma_{B_e}$
56499.5496	-1195	95	56587.4114	-981	88
56500.5066	-1194	90	56590.2538	-987	94
56587.2837	-1073	86	56590.2962	-980	86
56587.3264	-975	84	56615.2837	-1295	120
56587.3687	-1019	86	56615.3277	-1273	119

тометрические измерения этого объекта проводились очень нерегулярно. И только сейчас, на протяжении последних трех лет, осуществляется регулярный фотометрический мониторинг в  $U$ ,  $B$  и  $V$  полосах. Особенно велик промежуток между 1983 и 2011 гг. (более 27 лет), в котором мы не имеем сведений о фотометрическом поведении. Оценки магнитного поля более равномерно распределены по исследуемому интервалу времени. Поэтому было решено уточнить период вращения, используя оценки магнитного поля на 1-м телескопе САО РАН. Методика получения оценок такая же, как и в предыдущей работе Бычкова и др. [4]. Последние полученные данные магнитного мониторинга приведены в таблице 1.

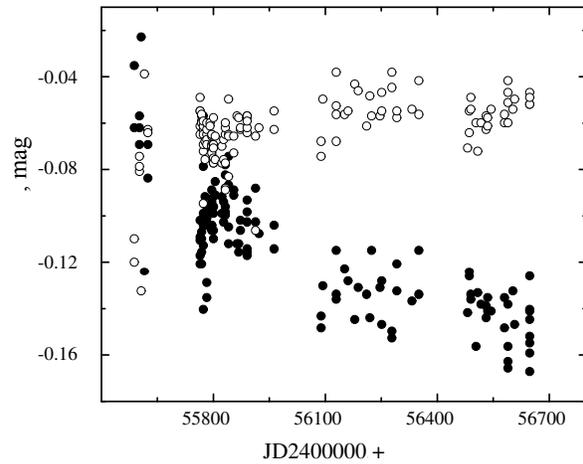
Была также проведена проверка модуляции магнитного поля с орбитальным периодом  $P_{\text{orb}} = 272.833$  дней, возможное наличие которой обсуждалось в работе [8]. Показано отсутствие такой модуляции на уровне 120 Гс. В результате магнитного мониторинга удалось уточнить период вращения GY And  $P_{\text{rot}} = 7936.5 \pm 22$  дня. Двухволновая фазовая кривая с этим периодом с учетом последних измерений приведена на рис. 2. Параметры средней кривой приведены в таблице 2.

## 3. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ 2011–2014 ГОДОВ

Фотометрические наблюдения GY And проводились на 60-см телескопе Zeiss-600 Крымской лаборатории Московского университета (п. Научный, Крым) с одноканальным фотометром [9]. В



**Рис. 3.** Измерения блеска GY And в  $U$ ,  $B$  и  $V$  фильтрах в 2011–2014 гг.  $U$  — заполненные квадраты,  $B$  — светлые кружки,  $V$  — заполненные кружки.



**Рис. 4.** Изменения цветов  $U - B$  и  $B - V$  GY And в течение 2011–2014 гг.  $B - V$  — заполненные кружки,  $U - B$  — светлые кружки.

течение 2011–2014 гг. было получено 420 оценок в широкополосной системе  $UBV$  Джонсона. Использовалась классическая методика наблюдений и редукиции для дифференциальной фотометрии переменных звезд. В качестве контрольной звезды использовалась HD 9935, которая близка по расположению на небесной сфере, по блеску и спектральному классу. Звезды наблюдались в последовательности «фон–звезда–фон» для каждого фильтра и в последовательности «стандартная звезда–Ар-звезда–стандартная звезда». В среднем накопленный сигнал, исправленный за воздушные массы и т.д., обеспечивал точность не менее  $0^m.01$ . Общее количество оценок блеска в каждом из  $U$ ,  $B$  и  $V$  фильтров составляло 140. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Из рис. 4 видно, что показатель цвета  $U - B$  изменился за три года от  $-0.06$  до  $-0.15$ . Согласно

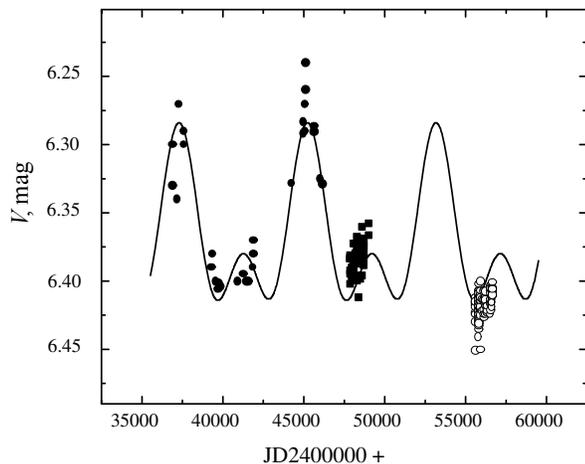
но [10], это соответствует повышению эффективной температуры приблизительно на 1020 К. Мы также выполнили частотный анализ по наблюдениям в  $U$ ,  $B$  и  $V$  фильтрах в 2011–2014 гг. с целью поиска возможных периодических изменений, используя метод и программу, любезно предоставленную Д. Курцем [11]. Но никакой значимой переменности для периодов более 15 часов на уровне  $\Delta m = 0.005$ – $0.007$  в зависимости от определенного цвета обнаружено не было. Поэтому мы разделили ряд фотометрических данных на 9 частей и вычислили средние значения оценок величин  $UBV$  и средний JD. Данные представлены в таблице 3.

**Таблица 3.** Средние  $UBV$  величины с их стандартными ошибками для GY And в 2011–2014 гг.

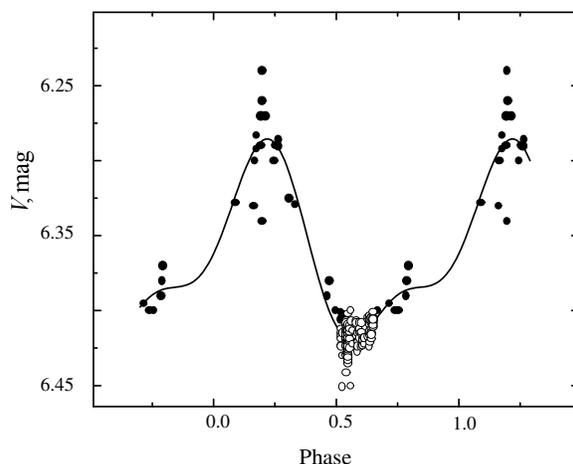
JD	$V$	$\sigma_V$	$B$	$\sigma_B$	$U$	$\sigma_U$	$N$
2455606.69	6.423	0.011	6.338	0.036	6.273	0.014	9
2455784.45	6.419	0.007	6.353	0.009	6.249	0.013	41
2455832.52	6.422	0.010	6.351	0.009	6.257	0.009	14
2455889.34	6.416	0.005	6.353	0.007	6.248	0.006	15
2456093.77	6.415	0.006	6.359	0.011	6.229	0.017	16
2456286.99	6.419	0.002	6.367	0.002	6.234	0.003	11
2456511.16	6.411	0.002	6.351	0.001	6.214	0.002	13
2456619.92	6.409	0.001	6.357	0.001	6.209	0.003	16
2456692.19	6.412	0.004	6.371	0.004	6.212	0.002	5

**Таблица 2.** Параметры переменности магнитного поля

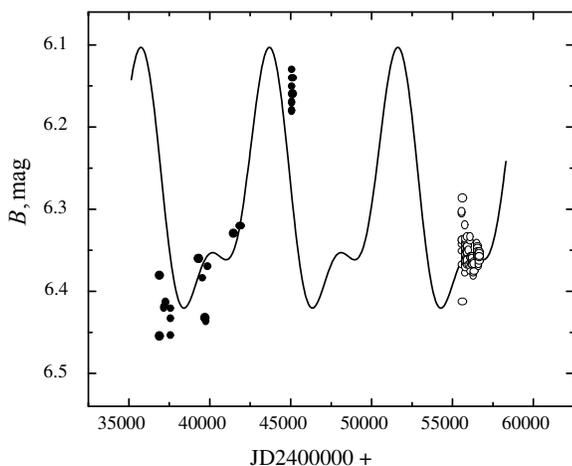
Параметр	Величина	$\sigma$
$T_0$	2433301.36	33
$P$ , дни	7936.51	22
$B_0$ , Гс	-198	14
$B_1$ , Гс	882	17
$B_2$ , Гс	229	20
$z_1$	0.947	0.004
$z_2$	0.079	0.010



**Рис. 5.** Изменение звездной величины в фильтре  $V$  со временем. Заполненные кружки — литературные данные, собранные до 1987 г. [4], заполненные квадраты — данные космической миссии Hipparcos, светлые кружки — наблюдения, полученные в данном исследовании на 60-см телескопе в Крыму. Кривая изображает фотометрическую переменность с периодом вращения.



**Рис. 6.** Переменность блеска в фильтре  $V$  с периодом вращения  $P_{\text{rot}} = 7936.5 \pm 22$  дня (21.7 года). Обозначения такие же, как и на рис. 5.



**Рис. 7.** Звездная величина в фильтре  $B$  в зависимости от момента получения. Заполненные кружки — литературные данные, собранные до 1987 г. [4], светлые кружки — наблюдения, полученные в данном исследовании на 60-см телескопе в Крыму. Кривая — фотометрическая переменность с периодом вращения. Обозначения такие же, как и на рис. 6.

#### 4. ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ

Систематический поиск литературных данных позволил нам проследить фотометрические свойства  $\gamma$  And на протяжении более 53 лет. На рис. 5 показаны измерения блеска в фильтре  $V$

начиная с 1958 г. Кривой изображена переменность блеска в фильтре  $V$  с периодом вращения  $P_{\text{rot}} = 7936.5 \pm 22$  дня (21.7 года). Там также нанесены измерения, полученные миссией Hipparcos в 1991–1994 гг., редуцированные в стандартную систему  $V$  Джонсона. Как видно из рис. 5, амплитуда переменности с периодом вращения в фильтре  $V$  достигает до  $0^{\text{m}}3$ . На рис. 6 показана переменность блеска в фильтре  $V$  с периодом вращения.

На рис. 7 показаны измерения блеска в фильтре  $B$  начиная с 1958 г. К сожалению, есть большой интервал времени (около 29 лет), когда измерения в этом фильтре не проводились. Следует отметить, что максимум блеска в фильтре  $V$ , по всей вероятности, совпадает с максимумом блеска в фильтре  $B$  (см. рис. 5). Показатель цвета  $B - V$  тоже демонстрирует в это время экстремальное значение (см. рис. 1). Изменения блеска в фильтре  $B$  с периодом вращения показаны на рис. 8. К сожалению, оценок блеска в фильтре  $U$  получено совсем немного, только в 1960-х и 2011–2014 гг. (настоящее исследование). Такое малое количество оценок не позволяет судить о виде долговременной переменности блеска в этом фильтре. Амплитуды долговременной фотометрической переменности  $\gamma$  And, полученные в данном исследовании, являются рекордно большими для такого типа звезд. Только эта Ар-звезда показывает фотометрическую переменность с периодом вращения, превышающую  $0^{\text{m}}3$ . В среднем фотометрическая переменность с периодом вращения в  $UBV$  фильтрах для Ар-звезд не превышает нескольких сотых, а часто и тысячных долей звездной величины.

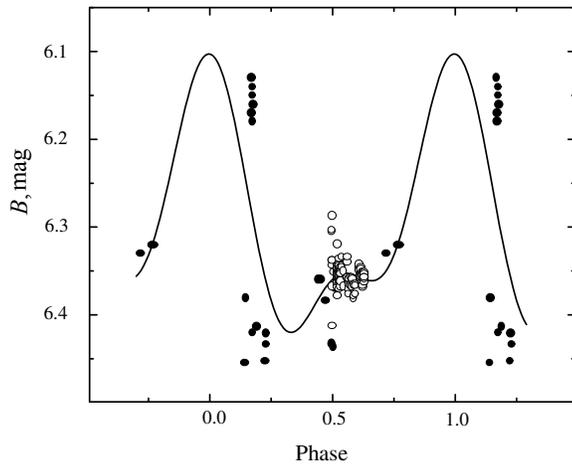


Рис. 8. Изменения блеска в фильтре  $B$  с периодом вращения. Обозначения такие же, как и на рис. 6.

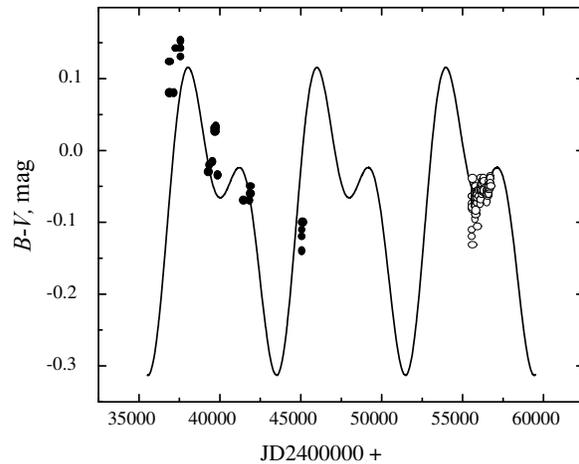


Рис. 9. Изменения цвета  $B - V$  с периодом вращения. Обозначения такие же, как и на рис. 6.

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Главный компонент двойной системы GY And является mCP-звездой с переменным эффективным магнитным полем с периодом  $P_{\text{mag}} = 7936.5$  дней (21.7 года), который является периодом осевого вращения согласно модели наклонного ротатора Стиббса-Престона [5, 12, 13]. Магнитная фазовая кривая имеет двухволновой вид, свидетельствующий о сложной (скорее всего, квадрупольной) структуре магнитного поля. Из этого вполне можно ожидать, что распределение неоднородностей, прежде всего температурных, определяющих фотометрическое поведение, на поверхности этой звезды тоже будет иметь сложный характер. На основании этого мы предполагаем, что фотометрические фазовые кривые будут иметь двухволновой вид, аналогичный переменности магнитного поля [4]. Т.е. фотометрическую переменность с периодом вращения предлагается описывать так:

$$V_i(\phi) = V_0 + V_1 \cos(\phi + z_1) + V_2 \cos(2\phi + z_2), \quad (1)$$

где

$$\phi = 2\pi \frac{T_i - T_0}{P_{\text{mag}}}. \quad (2)$$

Аналогично находились фазовые зависимости переменности и в  $B$  фильтре, и, соответственно, для показателя цвета  $B - V$ . На рис. 9 изображена средняя переменность показателя цвета  $B - V$  с периодом вращения. Очевидно, что найденная фазовая зависимость хорошо описывает переменность  $B - V$  с периодом вращения. К сожалению, недостаточное количество фотометрических данных и очень неравномерное распределение оценок по фазам периода вращения позволяют сделать

только предварительные выводы о виде фазовых кривых в  $B$  и  $V$  фильтрах. Для фильтра  $U$  данных пока слишком мало, чтобы сделать даже предварительные выводы. Но измерения 2011–2014 гг. показали наибольшее изменение блеска именно в фильтре  $U$ , достигающее  $0^{\text{m}}09$ , поэтому очень важно продолжить фотометрический мониторинг этого объекта.

### 6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В этом исследовании приводится очень плотный ряд фотометрических измерений, полученный за последние три года (2011–2014). Длительность этого ряда не превышает трех лет (13% от продолжительности периода вращения). Тем не менее, благодаря этим наблюдениям были получены однозначные доказательства в пользу правильности именно 21.7-летнего периода. Кроме этого, данная звезда является рекордной по амплитуде изменения блеска и цвета ( $\Delta m = 0.3$ ) в течение периода вращения по сравнению с другими Ар-звездами, переменность у которых в среднем не превышает нескольких сотых долей звездной величины. Благодаря проведенным исследованиям стало очевидно, что показатель цвета  $B - V$  меняется с периодом вращения 21.7 года, а не 87 лет. Период 87 лет является ложным и обусловлен скважностью наблюдений. В течение периода показатель цвета  $B - V$  меняется от 0.153 до  $-0.140$ , что соответствует изменению эффективной температуры от 8350 до 14440 K [10]. Такое большое изменение температуры может быть объяснено только наличием очень больших холодного и горячего пятен (или группы пятен). При этом разница температур

между холодными и горячими участками поверхности должна быть очень высока. Иначе нельзя объяснить столь сильное изменение цвета с периодом вращения. Планируется проведение дальнейшего фотометрического и магнитного мониторинга с целью детального изучения фотометрической и магнитной переменности.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарят Д. Курца за предоставление программы. Данное исследование было поддержано грантом № 2011/03/В/ST9/03281 польского Национального научного центра, российским грантом № 2043.2014.2 программы «Ведущие научные школы» и грантами Президента РФ МК-6686.2013.2 и МК-1699.2014.2. Наблюдения на 1-м телескопе САО РАН проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Griffin, *Observatory* **132**, 309 (2012).

2. F. Carrier, P. North, S. Udry, and J. Babel, *Astron. and Astrophys.* **394**, 151 (2002).
3. H. W. Babcock, *Astrophys. and Space Sci.* **30**, 141 (1958).
4. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, J. Madej, and A. V. Shatilov, *Acta Astronomica* **62**, 297 (2012).
5. D. W. N. Stibbs, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **110**, 395 (1950).
6. G. W. Preston, *Astrophys. J.* **150**, 871 (1967).
7. K. D. Rakosch and W. Fiedler, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **31**, 83 (1978).
8. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, J. Madej, and A. V. Schatilov, *Odessa Astron. Publ.* **23**, 23 (2010).
9. V. M. Lyutyj, *Soobshch. Gos. Astron. Inst. Sternberg* **172**, 30 (1971).
10. C. W. Allen, *Astrophysical Quantities*, 3rd ed. (Athlone, London, 1975).
11. D. W. Kurtz, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **213**, 773 (1985).
12. G. W. Preston, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **83**, 571 (1971).
13. G. W. Preston, *Astrophys. J.* **164**, 309 (1971).

## Photometric and Magnetic Variability of the Ap Star GY And

N. V. Metlova, V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej

We present the results of photometric and magnetic monitoring of a well-known long-period Ap star GY And. This research was inspired by the unusual “secular” variability of the  $B - V$  color index. Photometric monitoring was carried out with the 60-cm reflector of the Crimean Laboratory of the Moscow State University, where 420 brightness estimates were obtained during 2011–2014 with the Johnson system broadband  $U$ ,  $B$ , and  $V$  filters. Magnetic monitoring was carried out at the 1-m telescope of the Special Astrophysical Observatory. The duration of photometric observations is about 54 years, and the duration of magnetic monitoring is 64 years. As a result, we have refined the period and the parameters of variability of the magnetic field, and the photometric behavior. We demonstrate that the peculiar “secular” color variability is explained by the off-duty factor of the observations.

Keywords: *stars: chemically peculiar—stars: magnetic field—stars: individual: GY And*