

УДК 524.31, 524.354

**А. Ф. Холтыгин¹, С. Н. Фабрика², Н. А. Драке¹, В. Д. Бычков²,
Л. В. Бычкова², Г. А. Чунтонов², Т. Е. Бурлакова², Г. Г. Валявин³**

¹Астрономический институт Санкт-Петербургского государственного университета
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28
afkholtygin@gmail.com

²Специальная астрофизическая обсерватория АН России
369167, Карачаево-Черкессия, Нижний Архыз

³Observatorio Astronomico Nacional UNAM
Ensenada, BC, Mexico

Эволюция магнитного поля ОВА-звезд

Рассмотрены применения методов спектрального анализа, открытых Кирхгофом, для исследования звездных магнитных полей. На основании анализа данных двух каталогов магнитных полей исследованы статистические свойства средних магнитных полей ОВА-звезд. Показано, что в качестве адекватной характеристики магнитного поля звезды может быть использовано ее среднее эффективное магнитное поле \mathcal{V} . Построены функции распределения магнитного поля $F(\mathcal{V})$ звезд спектрального класса B и химически пекулярных CP -звезд, имеющие степенную зависимость от величины \mathcal{V} . Обнаружено резкое уменьшение функции $F(\mathcal{V})$ в области малых магнитных полей. Проанализированы статистические свойства магнитных потоков звезд главной последовательности, белых карликов и нейтронных звезд.

ЕВОЛЮЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ОВА-ЗІРОК, Холтигін А. Ф., Фабрика С. Н., Драке Н. А., Бичков В. Д., Бичкова Л. В., Чунтонов Г. А., Бурлакова Т. Е., Валявін Г. Г. — Розглядається застосування методів спектрального аналізу, відкритих Кірхгофом, для дослідження зоряних магнітних полів. На основі аналізу даних двох каталогів магнітних полів досліджено статистичні властивості середніх магнітних полів ОВА-зірок. Показано, що за адекватну характеристику магнітного поля зірки можна використовувати її середнє ефективне магнітне поле \mathcal{V} . Побудовано функцію розподілу магнітного поля $F(\mathcal{V})$ зірок спектрального класу B і хімічно пекулярних CP -зірок, що мають степеневу залежність від величини \mathcal{V} . Виявлено різке зменшення

© А. Ф. ХОЛТЫГИН, С. Н. ФАБРИКА, Н. А. ДРАКЕ, В. Д. БЫЧКОВ,
Л. В. БЫЧКОВА, Г. А. ЧУНТОНОВ, Т. Е. БУРЛАКОВА, Г. Г. ВАЛЯВИН, 2010

функції $F(B)$ в області малих магнітних полів. Проаналізовано статистичні властивості магнітних потоків зірок головної послідовності, білих карликів і нейтронних зірок.

MAGNETIC FIELD EVOLUTION IN OBA STARS, by Kholtygin A. F., Fabrika S. N., Drake N. A., Bychkov V. D., Bychkova L. V., Chountonov G. A., Burlakova T. E., Valyavin G. G. — Applications of the spectral analysis methods discovered by Kirchhoff for the study of stellar magnetic fields are considered. Statistical properties of mean magnetic fields of OBA-type stars were investigated basing on the information from two magnetic field catalogues. It is found that the mean effective magnetic field B can be used as a statistically significant characteristic of a stellar magnetic field. The magnetic field distribution function $F(B)$ was derived for B-type stars. It turned to be a power law, a sharp decrease of $F(B)$ was found in a weak magnetic fields range. Statistical properties of magnetic fluxes of Main-Sequence stars, neutron stars and white dwarfs are analysed.

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение магнитного поля звезд явилось результатом почти столетнего развития спектрального анализа. Современный спектральный анализ начался 150 лет назад с работ Кирхгофа 1859 г. Кирхгоф установил, что каждый элемент характеризуется своим набором спектральных линий, анализ интенсивностей которых позволяет определять химический состав и физические свойства излучающих тел, в том числе небесных объектов. Решающим шагом в построении методов измерения магнитных полей на основании анализа спектров небесных тел явилось открытие в 1897 г. расщепления линий дублета линий D_1 и D_2 натрия [38]. С этого времени явление расщепления линий в магнитном поле, названное эффектом Зеемана, использовалось для поиска магнитных полей, в частности магнитных полей звезд.

Впервые звездное магнитное поле было обнаружено на Солнце Джорджем Хэйлом, открывшим магнитные поля солнечных пятен в 1908 г. [16]. Однако до открытия магнитных полей других звезд прошло еще почти 40 лет. Лишь в 1947 г. Бэбкок обнаружил магнитное поле звезды 78 Vir, имеющее дипольную структуру и значение на полюсах около 150 мТл [6]. С этого времени интенсивно развивались методы определения магнитных полей звезд и накапливались результаты измерения звездных магнитных полей. К настоящему времени измерены магнитные поля свыше тысячи звезд различных спектральных классов от молодых звезд типа T Tau и Ae/Be-звезд Хербига (находящихся на стадии эволюции до главной последовательности) до белых карликов и нейтронных звезд.

Однако большинство измерений магнитных полей относится к звездам главной последовательности. Львиная доля из них приходит-

ся на химически пекулярные Ар- и Вр-звезды, обладающие регулярными магнитными полями большой величины, достигающими единиц тесла. Доля Ар/Вр-звезд, обладающих магнитным полем, доступным для современных измерений, достигает 10 % от полного числа таких звезд, тогда как для звезд других спектральных классов она заметно меньше.

Звезды спектрального класса F и более поздних с массами M (1.5...2) M_{\odot} часто обладают сильным и нерегулярным магнитным полем, образование которого связывается с действием динамо-механизма, сводящегося, в конечном итоге, к трансформации части механической энергии вращения звезды в энергию генерируемого магнитного поля. Для не имеющих конвективных оболочек более массивных звезд ранних спектральных классов с $M > 2M_{\odot}$ характерно наличие регулярных магнитных полей [10].

Исследования магнитных полей звезд ранних спектральных классов O, B и A, включающие подгруппу Ар/Вр-звезд, представляют особый интерес, так как происхождение магнитных полей этих звезд не вполне ясно до настоящего времени. Ряд исследователей полагает, что динамо-механизм эффективен и для горячих OBA-звезд. При этом предполагается, что магнитное поле формируется в конвективном ядре, а затем отдельные магнитные трубки всплывают в радиативной оболочке звезды [23]. Авторы цитируемой статьи предполагают, что таким образом возможно формирование магнитного поля на поверхности звезды с напряженностью в несколько десятков миллитесла, однако при этом остается непонятным, как в результате случайного процесса всплывания магнитных трубок может формироваться регулярная структура поля.

Более популярной в настоящее время является гипотеза о реликтовой природе магнитных полей OBA-звезд. В данной гипотезе считается, что наблюдаемое в настоящую эпоху магнитное поле звезды является остатком (реликтом) магнитного поля молекулярного облака, в котором сформировалась звезда [10]. Особый случай представляют звезды типа Вольфа — Райе (WR). До настоящего времени, несмотря на многочисленные попытки, магнитное поле этих звезд не было обнаружено. В то же время звезды типа WR представляют собой позднюю стадию эволюции O-звезд, магнитные поля которых обнаружены, поэтому наличие магнитного поля и у WR-звезд представляется вполне вероятным.

Пролить свет на механизмы формирования и эволюцию магнитных полей OBA-звезд могут статистические исследования связи основных характеристик звезд и величин их магнитного поля. В недавно опубликованном каталоге [11] приведены сведения об измерениях магнитных полей более чем 1000 звезд спектральных классов от O до M. Данные этого каталога, совместно с данными каталога [2] и результатами недавних измерений, не вошедших в указанные каталоги, использованы нами для настоящего исследования.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗВЕЗДЫ

Напряженность магнитного поля звезды определяется по величине зеемановского сдвига между лево- и право- циркулярно поляризованными компонентами профиля линии [6, 25]. Величина сдвига пропорциональна усредненному по диску звезды продольному компоненту B_l магнитного поля, который называется эффективным магнитным полем. Для измерения величины B_l часто ищется значимый сигнал в профилях линий непосредственно в параметре Стокса V . Для повышения точности измерения параметр V усредняется по большому числу линий с использованием методики LSD (least-squares deconvolution) [13].

Эффективное магнитное поле B_l зависит от фазы вращения звезды и изменяется от некоторого минимального значения B_{\min} до максимального значения B_{\max} , причем величины B_{\min} и B_{\max} часто имеют различные знаки. Таким образом, величина B_l не пригодна для выполнения статистических исследований магнитного поля большого ансамбля звезд. Необходимо поэтому использовать какую-либо глобальную характеристику поля, которая может быть получена из наблюдений и мало зависит от того, когда и при каких фазах вращения звезды были выполнены измерения.

Наибольшие вариации величины B_l с фазой вращения наблюдаются при дипольной структуре магнитного поля звезды, поэтому для выбора искомой характеристики магнитного поля достаточно проанализировать случай дипольного поля. В модели вращающегося магнитного диполя величина B_l описывается следующим выражением [30, 36]:

$$B_l = B_p \left(\frac{15}{20} \frac{u}{3+u} \cos^2 i \sin^2 \theta_0 + \frac{15}{20} \frac{u}{3+u} \sin^2 i \cos^2 \theta_0 \right), \quad (1)$$

где B_p — напряженность поля на полюсах, θ_0 — угол между осью магнитного диполя и осью вращения, i — угол наклона оси вращения к лучу зрения, θ_0 — значение фазы вращения, при котором значение B_l максимально, u — коэффициент в линейной аппроксимации закона потемнения к краю. Для звезд спектрального класса В значение $u = 0.35$ [33]. Ввиду слабой зависимости величины B_l от параметра u это же значение можно использовать и для звезд других спектральных классов.

В качестве искомой характеристики среднего магнитного поля звезды, имеющей слабую зависимость от случайных значений i и θ_0 и малочувствительной к значениям фаз вращения, рассмотрим среднее квадратичное поле (см. [8]):

$$B = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_l^i)^2}. \quad (2)$$

Суммирование распространяется на все выполненные измерения

поля B_i^i , где $i = 1, \dots, n$. Возможен выбор и других статистически существенных характеристик магнитного поля звезды, описанных в работе [4].

Для оценки средней точности измерения поля обычно употребляется величина

$$\mathcal{B} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_i^i)^2}. \quad (3)$$

Здесь B_i^i — средняя квадратичная ошибка i -го измерения поля. Величина \mathcal{B} не является стандартным отклонением среднего квадратичного поля \mathcal{B} , так как сама величина \mathcal{B} не является нормально распределенной случайной величиной, но, тем не менее, значение \mathcal{B} может служить мерой точности всей серии измерений поля. Обычно считается, что если

$$\mathcal{B} > 2 \sigma_{\mathcal{B}}, \quad (4)$$

то измеренные значения напряженности поля являются реальными. Для оценки достоверности выполненных измерений поля используется также стандартная статистика χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n (B_i^i)^2 / \sigma_{B_i^i}^2. \quad (5)$$

Вместо величины χ^2 часто также используется приведенное отношение χ^2/n [11]. При отсутствии у звезды магнитного поля математические ожидания величин B_i^i равны нулю. Малость величины χ^2/n по сравнению с единицей свидетельствует о справедливости гипотезы $B_i^i = 0$, т. е. об отсутствии у звезды магнитного поля, а значения $\chi^2/n \gg 1$ — о реальности выполненных измерений.

Чтобы выяснить, может ли величина \mathcal{B} быть использована в качестве характеристики среднего магнитного поля звезды, рассчитаем ее значения в пределе бесконечного числа измерений ($n \rightarrow \infty$), равномерно распределенных по фазам вращения звезды. Используя выражение (1) и заменяя суммирование интегрированием по фазам θ , получим:

$$\mathcal{B} = B_p \frac{1}{4(1-u/3)} \sqrt{\cos^2 \theta \cos^2 i + \frac{1}{2} \sin^2 \theta \sin^2 i}. \quad (6)$$

Усредненные по фазам вращения значения отношения \mathcal{B}/B_p изменяются (в зависимости от i и u) в пределах 0.12—0.30 со средним значением, близким к 0.20.

В реальных наблюдениях число измерений магнитного поля обычно невелико. Для того чтобы понять, как зависят в этом случае значения рассматриваемых нами величин от числа измерений поля в функции углов i и u , промоделируем процесс измерения поля следующим образом. Предположим, что измерения поля для каждого из возможных значений i и u выполнены N_{mf} раз, где число N_{mf} может быть равно единице.

Будем считать, что значения фаз вращения звезды ϕ , при которых измерено поле, являются случайными величинами, равномерно распределенными на промежутке $[0, 1]$. Предположим также, что значения i — случайные величины, определяемые произвольными ориентациями оси вращения звезды в пределах полного телесного угла 4π . В то же время значения угла θ , вероятно, изменяются в более узких пределах ($\approx 15^\circ$) со средним значением около 45° [5, 18]. По этой причине мы провели вычисления для двух вариантов пределов изменения угла θ : в промежутках $30\text{—}60^\circ$ и $0\text{—}90^\circ$.

Расчеты выполнялись таким образом: выбиралось около 5000 случайных значений углов i , θ , изменяющихся в указанных выше интервалах. Для каждой пары величин i и θ определялось N_{mf} случайных фаз вращения ϕ . Для всех из этих значений ϕ определялись величины B_i по формуле (1). Полученные величины B_i использовались для вычисления отношения \mathcal{B}/B_p по формуле (2). Так как данное отношение не зависит от величины B_p , то величина B_p принималась равной 1.

Для вычисленных отношений \mathcal{B}/B_p стандартным образом оценивались средние значения $\overline{\mathcal{B}/B_p}$ и стандартное отклонение σ . Результаты численного эксперимента показывают, что отношение $\overline{\mathcal{B}/B_p}$ изменяется в узких пределах от 0.17 до 0.20 с медианным значением 0.19. Даже для $N_{mf} = 2$ значения \mathcal{B}/B_p относительно малы, а величина \mathcal{B} статистически существенна для любых углов i и θ [4].

ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В каталоге [11] собраны доступные авторам литературные данные с добавлением результатов неопубликованных наблюдений, как собственных, так и наблюдений других исследователей. В каталоге приведены сведения об измерениях магнитного поля 1222 звезд главной последовательности, Ae/Be-звезд Хербига, белых карликов и звезд-гигантов, из которых 610 звезд являются химически пекулярными CP-звездами. Связь между аномалиями химического состава атмосфер и намагниченностью звезд известна давно. По различным оценкам количество CP-звезд по отношению к нормальным не превышает 10 % [7, 26, 31], но, несмотря на их относительную малочисленность, они являются более исследованными в плане измерений магнитных полей. Рассмотрим выборку ОВА-звезд из каталога [11]. В нем приведены сведения об измерениях магнитного поля, проводившихся для 11 звезд спектрального класса O, 466 звезд спектрального класса B и 472 звезд спектрального класса A. Не все из проведенных измерений удовлетворяют критерию (4), поэтому число реальных измерений значительно меньше приведенных в каталоге.

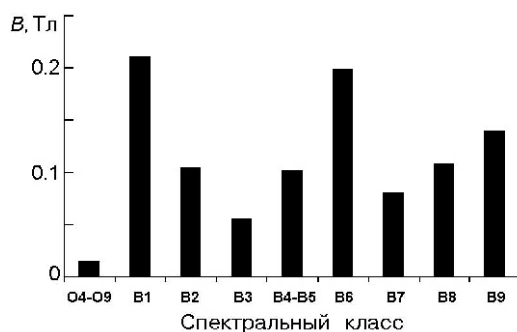


Рис. 1. Функция распределения среднего по спектральным классам магнитного поля OB-звезд

С момента сдачи каталога [11] в печать появились результаты новых измерений магнитных полей OBA-звезд [9, 18, 20, 24, 29, 32, 33]. Данные новых измерений магнитного поля OB-звезд, представленные в цитированных работах и не включенные в каталог [11], использовались нами в дальнейшем при анализе статистических свойств магнитных полей OB-звезд.

На рис. 1 приведены усредненные по спектральным подклассам магнитные поля OB-звезд по данным каталога [11]. Так как число измерений магнитного поля звезд спектрального класса O, удовлетворяющих критерию (4) мало (восемь O-звезд), то на рисунке приведено значение, среднее для всех O-звезд.

Хотя разброс значений B для звезд одного подкласса весьма велик, и стандартные отклонения этих значений для спектральных подклассов B1—B3 и B5—B9 сравнимы с самими значениями B , можно сделать предварительный вывод о скачке средних величин при переходе от звезд спектрального класса O к звездам спектрального класса B. Для звезд спектрального подкласса B4 в каталоге приводятся измерения магнитного поля только для одного объекта (HD 175362), поэтому значения B были усреднены для всех звезд спектральных подтипов B4—B5.

Причина подобного скачка в значениях B остается пока неясной. Отметим, что при предположении приблизительного постоянства магнитного потока для OB-звезд [29] такой скачок мог бы быть частично объяснен большими радиусами O-звезд в сравнении с радиусами звезд спектрального класса B. Возможно также, что указанный эффект связан со значительной скоростью потери массы O-звездами и выносом магнитного потока звездным ветром.

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ В И А

Для того чтобы выяснить, как средние магнитные поля звезд зависят от параметров звезд мы использовали значения B , приведенные в каталогах [2, 11], а также новые величины B , представленные в работах,

цитированных в предыдущем пункте. Среди измерений магнитных полей, приведенных в каталоге [11], имеются значения недостаточной точности, которые статистически несущественны. Для отбора существенных значений \mathcal{B} мы применяли критерий (4).

Построим на основе указанных каталогов дифференциальную функцию распределения магнитного поля $f(\mathcal{B})$ (функция магнитного поля), введенную в работе [3]. Эта функция определяется следующим образом:

$$N(\mathcal{B}, \mathcal{B} + \Delta \mathcal{B}) - N(\mathcal{B}, \mathcal{B}) \approx f(\mathcal{B}) \Delta \mathcal{B}, \quad (7)$$

где $N(\mathcal{B}, \mathcal{B} + \Delta \mathcal{B})$ — число звезд в интервале средних магнитных полей $(\mathcal{B}, \mathcal{B} + \Delta \mathcal{B})$, N — полное число звезд с измеренными значениями \mathcal{B} .

Для построения функции магнитного поля по данным [11] используем выборку, включающую только звезды спектрального класса В. Построенная функция распределения $f(\mathcal{B})$ показана на рис. 2, а. Интервалы разбиения области средних магнитных полей выбирались таким образом, чтобы в каждый интервал попало бы не менее восьми звезд. И только в областях $\mathcal{B} < 6$ мТл и $\mathcal{B} > 500$ мТл это число оказалось меньше восьми из-за малости числа звезд с очень малыми и очень большими значениями напряженностей магнитных полей.

Полученная нами зависимость $f(\mathcal{B})$ в области $\mathcal{B} \approx 40$ мТл может быть аппроксимирована степенной функцией

$$f(\mathcal{B}) = A_0 \frac{\mathcal{B}}{B_0}^{-\alpha}. \quad (8)$$

Оказалось, что в широком интервале значений \mathcal{B} (0.04—1.2 мТл) функция распределения $f(\mathcal{B})$ для звезд спектрального класса В может быть описана единой зависимостью (8) с параметрами $A_0 = 0.33$ и $\alpha = 1.82$.

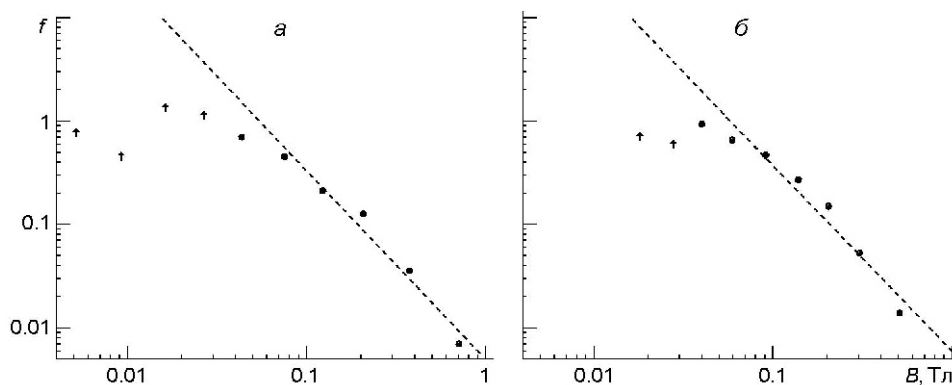


Рис. 2. Функции распределения магнитного поля \mathcal{B} звезд по данным каталога [11]. Стрелками показаны значения $f(\mathcal{B})$ при $\mathcal{B} < 40$ мТл. Справа: то же, что на левом рисунке, но для химически peculiarных CP-звезд по данным каталога [2]

В работе [2] представлен каталог магнитных полей химически пекулярных CP-звезд, включающий 355 объектов спектральных классов В и А. Магнитные поля 282 объектов каталога [2] удовлетворяют критерию (4). Функция магнитного поля, построенная по данным каталога [2], также имеет вид (8). Параметры аппроксимации $A_0 = 0.37 \pm 0.06$ и $\alpha = 1.80 \pm 0.19$. Отметим, что параметры аппроксимаций функций магнитного поля, построенных по данным рассматриваемых нами двух каталогов, совпадают в пределах ошибок аппроксимации, несмотря на то, что в них входят разные объекты. Тем самым можно сделать предварительный вывод о единой функции магнитного поля, по крайней мере для магнитных звезд ранних спектральных классов.

В работе [1] построена функция поверхностного магнитного поля по выборке из 57 ярких ($V < 4.0^m$) магнитных звезд главной последовательности спектральных классов В3—F9. Функция магнитного поля была аппроксимирована степенной зависимостью. В области $B > 0.4$ Тл получено значение $\alpha = 2.2$, что близко к величине, определенной нами. В области магнитных полей 0.1—0.6 Тл в работе [1] получено значение $\alpha = 1$ и сделан вывод о наличии излома функции магнитного поля в области $B_s = 0.3 \dots 0.5$ Тл, где B_s — поверхностное поле звезды, которое в 3-4 раза больше значения B [1]. Данные нашей работы не противоречат выводу о наличии такого излома (см. рис. 2), однако ввиду относительно малого количества звезд с измеренными магнитными полями в указанной области значение параметра α не может быть надежно установлено.

Особый интерес представляет поведение функции $f(B)$ при относительно малых значениях $B \approx 40$ мТл. Соответствующие значения функции $f(B)$, рассчитанные согласно соотношению (7), показаны на рис. 2 стрелками. При таких значениях B поведение функции $f(B)$ не следует зависимости (8).

При малых средних напряженностях магнитного поля $B \approx 10$ мТл значения функции $f(B)$ меньше получаемых согласно аппроксимации (8) более чем на порядок. Таким образом, можно предположить, что при значениях B , меньших порогового значения $B^* \approx 40$ мТл, эмпирическая функция распределения магнитного поля резко убывает.

Отклонения зависимости $f(B)$ от закона (8) могут быть связаны с малой вероятностью обнаружения относительно слабых магнитных полей. Рассмотрим следующую модель. Пусть проводится большое количество измерений магнитных полей различных звезд со спектрополяриметром, обеспечивающим точность измерения поля δ_B . Опишем методику вычисления вероятности обнаружения слабого магнитного поля звезды со средним магнитным полем B при n случайных измерениях поля. Предположим, что модельная звезда, для которой выполняется измерение поля, обладает дипольным магнитным полем с напряженностью поля на полюсах B_p и $N_{tot} \gg 1$ случайными зна-

чениями углов i и ϕ , а наблюдения проводятся при n случайных фазах вращения. Во многих работах принимается, что если хотя бы для одного измерения значение $|B_i| > 3 \sigma$, где σ — средняя квадратичная ошибка измерения, то поле считается обнаруженным.

Для большей общности предположим, что если для k из n случайных значений фаз вращения в момент измерения поля абсолютное значение измеренного продольного компонента поля $|B_i|$ превысит 3σ , то поле будет считаться зарегистрированным. Тогда вероятность обнаружения поля равна

$$P(n, \sigma, \mathcal{B}, k) = \frac{N_{\text{дет}}}{N_{\text{tot}}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{дет}}$ — число измерений, в которых поле будет обнаружено согласно указанному выше критерию. На рис. 3, а даны вероятности $P(n, \sigma, \mathcal{B}, k)$ при ошибке измерения $\sigma = 5$ мТл, $n = 6$ измерениях поля и значениях $k = 1, 2, 3, 6$. Видно, что критерий k из n слишком сильный, так как при принятии такого критерия даже при значении $\mathcal{B} = 50$ мТл вероятность обнаружения поля равна $1/2$.

Значение же $k = 1$ кажется нам недостаточным, так как вероятность того, что условие $B_i > 3 \sigma$ будет выполнено в результате случайной ошибки измерения поля, весьма велика. Будем поэтому использовать принятое во многих наблюдательных работах значение $k = 2$ и обозначать $P(n, \sigma, \mathcal{B}, 2) = P(n, \sigma, \mathcal{B})$. Отметим, что при значениях $n > 6$ значения вероятностей обнаружения поля $P(n, \sigma, \mathcal{B})$ практически не изменяются.

Выясним, как бы выглядела функция распределения магнитного поля при заданной ошибке измерений σ при предположении, что

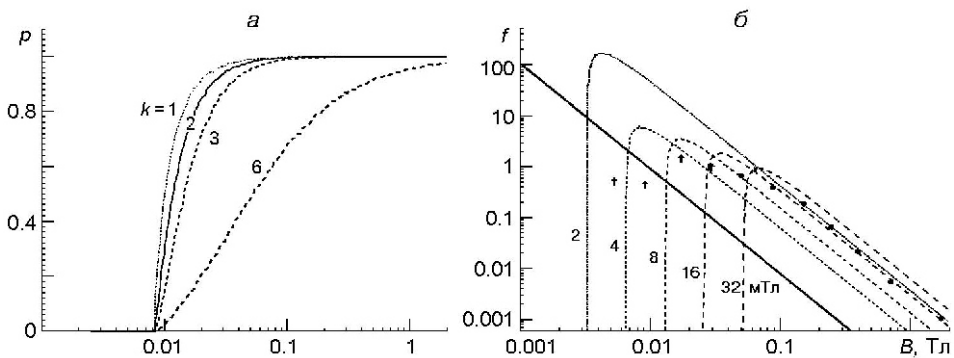


Рис. 3. а — вероятность обнаружения магнитного поля звезды со средним магнитным полем \mathcal{B} ($\sigma = 5$ мТл); б — функция распределения магнитного поля, рассчитанная в предположении, что степенная зависимость (10) справедлива во всей области измерения магнитных полей (жирная сплошная линия). Пунктирные линии — функции распределения магнитного поля ОВ-звезд, исправленные за возможное необнаружение слабых магнитных полей при фиксированной точности измерения σ . Значения σ указаны у соответствующих кривых. Жирные точки и вертикальные стрелки имеют то же значение, что и на рис. 2

вероятность обнаружения слабых полей описывается соотношением (9). Учитывая, что при $\mathcal{B} > 40$ мТл и при величине $\mathcal{B}_c = 10$ мТл, как правило, превышающей ошибки современных измерений магнитных полей, функция $P(\mathcal{B}, \mathcal{B}_c, n) \approx 1$, предположим, что в области $\mathcal{B} > \mathcal{B}_c = 40$ мТл магнитное поле было обнаружено у всех звезд, для которых были проведены соответствующие измерения. Пусть \mathcal{B}_{\min} — минимальное значение среднего магнитного поля, которое может быть еще определено при современной точности измерений. Опираясь на данные работ [5, 24, 32], можно сделать вывод, что $\mathcal{B}_{\min} \approx 2.5$ мТл. Предположим, что функция распределения магнитного поля во всей области $\mathcal{B} > \mathcal{B}_{\min}$ описывается степенной зависимостью (8). Нормированная функция распределения будет равна:

$$f^{real}(\mathcal{B}) = A_* \mathcal{B}^{-1}, \quad (10)$$

где принято, что $\mathcal{B}_0 = 100$ мТл, т. е. \mathcal{B} измеряется в килогауссах, а множитель $A_* = (1/\mathcal{B}_{\min})^{-1}$ определяется условием нормировки

$\int_{\mathcal{B}_{\min}}^{\infty} f^{real}(\mathcal{B}) d\mathcal{B} = 1$. Пусть вероятность обнаружения поля равна описан-

ной выше функции $P(\mathcal{B}, \mathcal{B}_c, n)$, тогда число звезд, которое будет обнаружено в интервале $\mathcal{B}, \mathcal{B} + \Delta\mathcal{B}$ при данном значении \mathcal{B}_c , равно

$$N(\mathcal{B}, \mathcal{B} + \Delta\mathcal{B}) = N_B \int_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B} + \Delta\mathcal{B}} f_B(\mathcal{B}) d\mathcal{B} = N_B \int_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B} + \Delta\mathcal{B}} P(\mathcal{B}, \mathcal{B}_c, n) f^{real}(\mathcal{B}) d\mathcal{B}. \quad (11)$$

Здесь N_B — число звезд, у которых будет обнаружено магнитное поле при заданном значении \mathcal{B}_c , N_* — полное число звезд в ансамбле магнитных звезд со средними напряженностями поля, распределенными по закону (10). Из соотношения (11) следует

$$\begin{aligned} f_B(\mathcal{B}) &= P(\mathcal{B}, \mathcal{B}_c, n) f^{real}(\mathcal{B}) \frac{N_*}{N_B} = \\ &= P(\mathcal{B}, \mathcal{B}_c, n) f^{real}(\mathcal{B}) \frac{1}{Q_B}. \end{aligned} \quad (12)$$

В поправочном множителе Q_B учтено, что при ненулевом значении \mathcal{B}_c число $N_B < N_*$.

Используя формулу (11), легко получить, что

$$Q_B = \frac{N_B}{N_*} = \int_{\mathcal{B}_{\min}}^{\infty} P(\mathcal{B}, \mathcal{B}_c, n) f^{real}(\mathcal{B}) d\mathcal{B}. \quad (13)$$

Значения $f^{real}(\mathcal{B})$, рассчитанные по соотношению (12), представлены на рис. 3, б. Величина $f_B(\mathcal{B})$ является функцией распределения поля, которая была бы построена по наблюдениям ансамбля магнитных звезд со средними полями, распределенными по закону (10), при

использовании идеального спектрополяриметра, обеспечивающего для всех наблюдаемых звезд погрешность измерения продольной составляющей поля, равную δ_B .

Из анализа рис. 3 можно сделать вывод, что хотя полученная по наблюдениям магнитного поля функция $f(B)$ при $B > 40$ мТл может быть описана восстановленной функцией $f_B(B)$ при $\delta_B = 2$ мТл, функция магнитного поля в области слабых магнитных полей не может быть воспроизведена ни при каком значении δ_B . Возможно, что объяснение завала функции магнитного поля в области $B < 40$ мТл только эффектами наблюдательной селекции неполно, так как точность измерения поля δ_B в настоящее время достаточно велика и составляет 2—10 мТл [5, 24, 32], что позволяет детектировать поля и в области 4—12 мТл. Из рис. 3 видно, что при таких значениях δ_B должно быть обнаружено значительно большее число звезд с магнитными полями в указанном интервале.

Есть альтернативное объяснение быстрого убывания функции $f(B)$ в области $B < 20..40$ мТл. Глаголевский и Чунтонов [15] предположили, что если среднее магнитное поле звезды оказывается меньше некоторого порогового значения B_p^n , то за короткое время напряженность поля в атмосфере звезды уменьшается практически до нуля вследствие процессов меридиональной циркуляции.

В работе [5] описаны измерения магнитных полей 28 Ap/Vp-звезд; для 24 программных звезд была аппроксимирована фазовая зависимость измеренных значений продольной компоненты поля B_l в модели наклонного вращающегося диполя и получены значения напряженности поля на полюсах B_p . По полученным значениям B_p построена гистограмма числа звезд в интервалах $\ln B = 0.2$ dex. Было обнаружено, что число звезд со значениями $B_p > 30$ мТл крайне мало. На основе этого факта высказано предположение, что при $B_p > B_p^n$ есть стабильные конфигурации глобального магнитного поля звезды, тогда как при $B_p < B_p^n$ глобальное магнитное поле разрушается в альвендовской шкале времени вследствие неустойчивости магнитного поля. Согласно [35, 36] наиболее важным типом неустойчивости, разрушающей магнитное поле, является пинчевая.

Предельное значение $B_p^n = 30$ мТл, полученное в работе [5], соответствует величине $B^n = B_p^n/5 = 6$ мТл, что в 6-7 раз меньше полученного нами предельного значения $B^n = 40$ мТл. Причиной такого значительного расхождения может быть малость числа объектов с измеренными значениями B_p в работе [5]. Кроме того, анализ рис. 6 в работе [5] показывает, что, возможно, есть еще одно резкое уменьшение числа звезд при значении $\ln(B_p) = 1.2$, что соответствует среднему магнитному полю $B = 30$ мТл, близкому к значению порогового магнитного поля, полученному нами.

СТАТИСТИКА МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ ЗВЕЗД

Полный магнитный поток F звезды является важной характеристикой ее магнитного поля, и в сферической системе координат (r, θ, ϕ) равен

$$F = \int_S (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}) dS = R_*^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi B_r \sin \theta d\theta d\phi, \quad (14)$$

Здесь \mathbf{B} — вектор напряженности магнитного поля на поверхности звезды, B_r — его радиальная проекция, \mathbf{n} — вектор нормали, R_* — радиус звезды. Интегрирование по формуле (14) в случае дипольного поля дает $F_d = (4/3) B_p R_*^2$. Магнитные потоки звезд с известными значениями среднего магнитного поля \mathcal{B} в дальнейшем будем оценивать по следующей формуле:

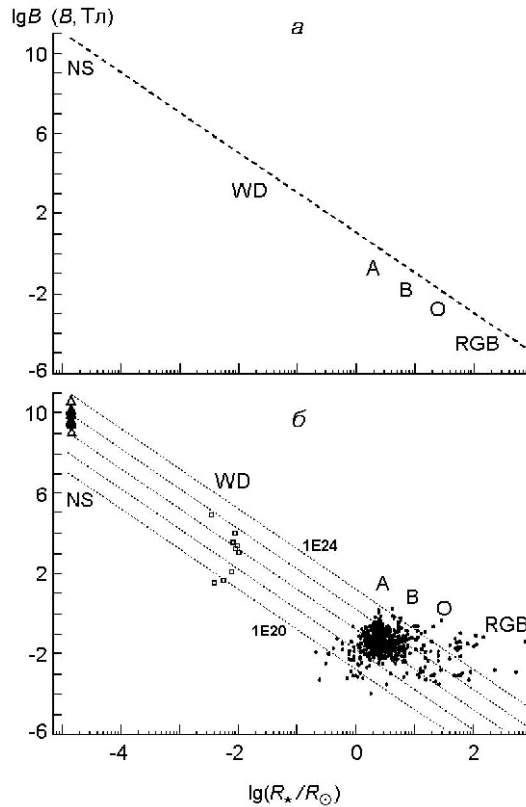
$$F \approx 4 \mathcal{B} R_*^2. \quad (15)$$

Эта формула дает хорошие оценки магнитного потока звезд, так как даже в крайнем случае дипольного поля $F \approx 5/3 F_d$. Для более сложной структуры поля различия оценки (15) и точного значения, вычисленного по формуле (14), значительно меньше.

Во многих теоретических исследованиях предполагается [14] постоянство магнитного потока звезды во время ее эволюции. Рассмотрим в первую очередь зависимость магнитного поля звезд от их радиусов в идеальном случае постоянства магнитного потока для всех звезд. Положим, что для всех звезд магнитный поток равен величине $F_0 = 7 \cdot 10^{23}$ Тл см² — магнитному потоку сверхгиганта ¹ Ori типа O6 [29]. Тогда согласно формуле (15) средняя напряженность магнитного поля звезды $\mathcal{B} = F_0 / (4 R_*^2)$. Рассчитанная таким образом зависимость $\mathcal{B}(R_*)$ представлена на рис. 4, а. На рисунке отмечены области радиусов звезд спектральных классов O, B и A, белых карликов (WD), нейтронных звезд (NS) и красных гигантов (RGB). Видно, что приближение постоянства магнитного потока может качественно объяснить многообразие звездных магнитных полей.

Для построения реальной зависимости магнитных полей от радиуса звезды необходимо знание как магнитных полей, так и радиусов звезд. С этой целью нами были получены радиусы R_* для всех звезд, включенных в каталог [11]. Примерно для 100 объектов радиусы были взяты из каталога звездных радиусов [28], а для звезд, отсутствующих в данном каталоге, величины R_* были найдены по стандартной зависимости радиуса звезды от ее спектрального класса [12]. Полученная зависимость магнитных полей звезд от их радиусов показана на рис. 4, б. Виден большой разброс значений \mathcal{B} для звезд с близкими радиусами, что очевидным образом связано с различием их магнитных потоков. На этот же рисунок были нанесены положения изоли-

Рис. 4. Зависимость магнитного поля звезды от ее радиуса в идеальном случае постоянства магнитного потока $F = 7 \cdot 10^{23}$ Тл см² для всех звезд (а) и реальная зависимость магнитных полей звезд от их радиусов (б). Показаны положения нормальных звезд каталога [11] (точки), белых карликов (квадратики) и нейтронных звезд (треугольники). Пунктирными линиями отмечены линии постоянных магнитных потоков: 10^{20} , 10^{21} , 10^{22} , 10^{23} и 10^{24} Тл см² (снизу вверх)



рованных белых карликов (WD). Значения радиусов белых карликов и значений их поверхностных магнитных полей B_s взяты из каталога [27]. Для перехода от величин B_s к средним квадратичным магнитным полям B использовано соотношение [14]

$$B_s = \frac{F}{R_*^2}, \quad (16)$$

а величины B находились по формуле (15). Кроме того, на рис. 4, б показаны положения нейтронных звезд (NS) со сверхсильными магнитными полями (магнетаров). Для всех нейтронных звезд было принято стандартное значение радиуса 10 км, а величины их магнитных полей были взяты из списка McGill SGR/AXP Online Catalog [http://www.physics.mcgill.ca/sim_pulsar/magnetar/main.html].

Положения белых карликов на рис. 4 согласуется с предположением о реликтовой природе их магнитных полей. Видно также, что имеющихся у звезд главной последовательности магнитных потоков вполне достаточно для того, чтобы обеспечить сверхсильные магнитные поля нейтронных звезд при справедливости гипотезы [14] о постоянстве магнитных потоков массивных звезд в ходе их эволюции от главной последовательности до образования нейтронной звезды.

Для прояснения вопроса о том, насколько сильно могут отличаться магнитные потоки звезд с близкими радиусами, проанализируем

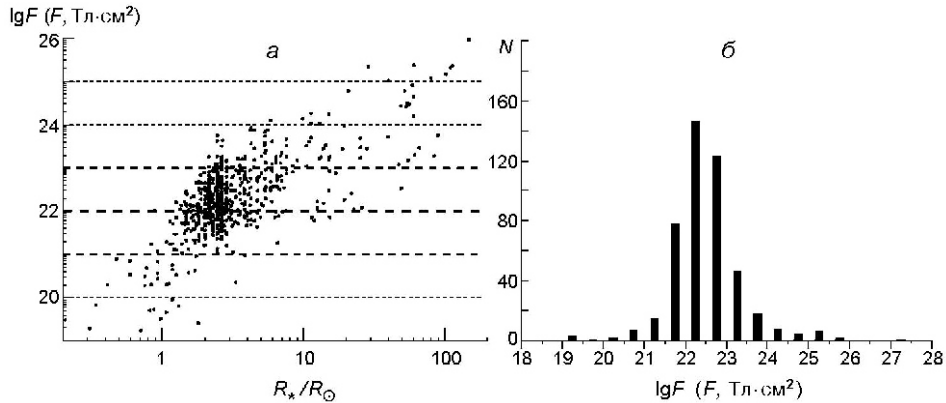
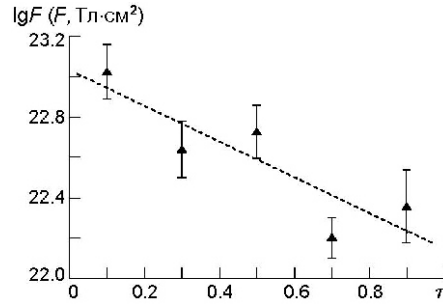


Рис. 5. Зависимость магнитных потоков звезд от их радиуса для объектов каталога [11] (а) и функция распределения магнитных потоков звезд в каталоге [11] (б)

зависимость магнитных потоков F от радиуса звезды, представленную на рис. 5, а. Видно, что хотя магнитные потоки для звезд с одним и тем же радиусом могут различаться на три и более порядков, заметна концентрация значений $\lg F$ в более узкой области (21.4—23.2). Медианное значение величины $\lg F$ составляет 26.4. Обращает на себя внимание заметное увеличение значений магнитных потоков с ростом радиуса звезды. Возможно, что такая зависимость связана с эффектами наблюдательной селекции, так как в области больших значений радиуса звезды (для звезд-гигантов) магнитные потоки $F < 10^{22}$ Тл см² соответствуют значениям напряженности магнитного поля $B < 2$ мТл, трудно обнаружимым современными методами измерения магнитных полей. Представленная на рис. 5, б гистограмма распределения величины $\lg F$ показывает заметную асимметрию распределения потоков и недостаточность числа звезд с малыми значениями $\lg F$ по сравнению с числом звезд с потоками, большими среднего значения $\lg F = 22.4$. Среднее значение магнитного потока белых карликов, представленных на рис. 4, равно 21.6, т. е. средний магнитный поток белых карликов, данные о поверхностном магнитном поле которых имеются в каталоге [27], в шесть раз меньше, чем у звезд главной последовательности. Это означает, в частности, что даже если магнитный поток звезд промежуточных масс уменьшается в ходе их эволюции после главной последовательности, оставшегося потока может оказаться достаточно для объяснения измеряемых напряженностей магнитного поля белых карликов.

Одной из причин большого разброса значений потоков звезд главной последовательности одного спектрального подтипа с близкими радиусами может быть предположение о том, что магнитный поток звезд может существенно изменяться во время ее эволюции на главной последовательности. Для прояснения данного вопроса рассмот-

Рис. 6. Зависимость средних магнитных потоков \mathcal{F} звезд спектрального класса В от относительного времени жизни звезды на главной последовательности. Треугольники — значения \mathcal{F} , усредненные по интервалам $\tau = 0.2$, пунктир — экспоненциальная аппроксимация зависимости $\mathcal{F}(\tau)$



рим выборку звезд спектральных подтипов В4—В9 с близкими массами $(3—5)M_{\odot}$, для которых в работе [19] определены абсолютные и относительные времена жизни на главной последовательности.

Зависимость $\lg F$ от относительного времени жизни звезды (в долях полного времени жизни на главной последовательности) представлена на рис. 6. Мы усреднили значения $\lg F$ в интервалах $\tau = 0.2$. Видно, что величины $\lg F(\tau)$ регулярно убывают с увеличением величины τ в согласии с выводом [19]. Скорость убывания магнитных потоков можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью

$$F(\tau) = F_0 e^{-a\tau}, \quad (17)$$

где величина $F_0 = 1.09 \cdot 10^{23}$ Тл см², а $a = 2.04$.

Зависимость среднего магнитного поля \mathcal{B} от времени жизни звезды на главной последовательности проанализирована в работе [4]. Оказалось, что зависимость $\mathcal{B}(\tau)$ также можно аппроксимировать экспоненциальной функцией с показателем $a = 2.01$. Таким образом, скорости убывания как магнитного поля, так и магнитного потока звезд спектрального класса В одинаковы, что очевидным образом объясняется малыми вариациями радиусов звезд во время их эволюции на главной последовательности.

Уменьшение среднего эффективного магнитного поля B с увеличением величины τ обнаружено в работе [17]. В работе [21] проанализирована зависимость среднего квадратичного магнитного поля \mathcal{B} и магнитного потока \mathcal{F} звезд спектральных классов А и В от их времени жизни на главной последовательности. Было установлено, что для ранних А и поздних В звезд с массами $(3—5)M_{\odot}$ вариации как \mathcal{B} , так и \mathcal{F} малы, за исключением первых 15—20 % времени жизни звезды на главной последовательности. Согласно [21] в интервале $0 < \tau < 0.2$ среднее магнитное поле и магнитный поток указанных звезд уменьшаются в 3-4 раза, а затем остаются практически постоянными, что согласуется с полученными нами скоростями убывания указанных величин. Убывание среднего магнитного поля B звезд, показанное на рис. 6, может быть связано с отмеченной выше диссипацией слабых магнитных полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Через 90 лет после формулирования Кирхгофом принципов спектрального анализа появилась возможность на их основе определять магнитные поля звезд. За прошедшие с момента открытия звездных магнитных полей более шести десятилетий измерены магнитные поля свыше тысячи звезд различных спектральных классов. На основании статистического анализа каталогов магнитных полей Бычкова и др. (2009) и И. И. Романюка, Д. О. Кудрявцева (2008) проанализированы статистические свойства средних магнитных полей ОВА-звезд. Построена функция распределения среднего магнитного поля звезд спектральных классов В и А, и обнаружено ее резкое уменьшение в области малых магнитных полей. Проанализированы статистические свойства магнитных потоков звезд главной последовательности, белых карликов и нейтронных звезд. Установлено, что значения потоков у белых карликов и нейтронных звезд согласуются с предположением о происхождении их магнитных полей как реликтов магнитных полей звезд главной последовательности.

Настоящее исследование выполнено в рамках программы Президента РФ финансовой поддержки ведущих научных школ (грант НШ-1318.2008.2).

1. Монин Д. Н., Фабрика С. Н., Валявин Г. Г. Магнитный обзор ярких звезд северного неба. Новые результаты. — Нижний Архыз, 2002.—29 с.—(Препринт / САО; № 150).
2. Романюк И. И., Кудрявцев Д. О. Магнитные поля химически пекулярных звезд. I. Каталог магнитных CP-звезд // *Астрофиз. бюллетень*.—2008.—**63**.—Р. 148—165.
3. Фабрика С. Н., Штоль В. Г., Валявин Г. Г., Бычков В. Д. Измерения магнитных полей белых карликов // *Письма в астроном. журн.*—1997.—**23**.—С. 43—47.
4. Холтыгин А. Ф., Фабрика С. Н., Драке Н. А. и др. Статистика магнитных полей ОВ звезд // *Письма в астроном. журн.*—2010.—**36**.—С. 389—399.
5. Auriere M., Wade G. A., Silvester J., et al. Weak magnetic fields in Ap/Bp stars. Evidence for a dipole field lower limit and a tentative interpretation of the magnetic dichotomy // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**475**.—Р. 1053—1065.
6. Babcock H. W. Zeeman effect in stellar spectra // *Astrophys. J.*—1947.—**105**.—Р. 105—119.
7. Bagnulo S., Landstreet J. D., Mason E., et al. Searching for links between magnetic fields and stellar evolution. I. A survey of magnetic fields in open cluster A- and B-type stars with FORS1 // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**450**.—Р. 777—791.
8. Bohlender D. A., Landstreet J. D., Thompson I. B. A study of magnetic fields in Ap Si and He weak stars // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**269**.—Р. 355—376.
9. Bouret J.-C., Donati J.-F., Martins F., et al. The weak magnetic field of the O9.7 supergiant zeta Orionis A // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—**389**.—Р. 75—85.
10. Braithwaite J., Nordlund A. Stable magnetic fields in stellar interiors // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**450**.—Р. 1077—1095.
11. Bychkov V. D., Bychkova L. V., Madej J. Catalogue of averaged stellar effective magnetic fields. II. Re-discussion of chemically peculiar A and B stars // *Mon. Notic.*

- Roy. Astron. Soc.—2009.—**394**.—P. 1338—1350.
12. Cox A. N. (Ed.) Allen's astrophysical quantities: Forth Ed. — New-York: Springer, 2000.—719 p.
 13. Donati J.-W., Semel M., Carter B. D., et al. Spectropolarimetric observations of active stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1997.—**291**.—P. 658—682.
 14. Ferrario L., Wickramasinghe D. Modelling of isolated radio pulsars and magnetars on the fossil field hypothesis // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2006.—**367**.—P. 1323—1328.
 15. Glagolevskij Yu. V., Chuntunov G. A. Some comments on evolution of magnetic fields of CP stars // Magnetic fields of chemically peculiar and related stars: Proc. Intern. Meeting, held in Special Astrophysical Observatory of Russian AS, Sept. 23—27 / Eds Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk. — 2000.—P. 149—150.
 16. Hale G. E. On the probable existence of a magnetic field in Sun-spots // Astrophys. J.—1908.—**28**.—P. 315—343.
 17. Hubrig S., North P., Scholler M. Evolution of magnetic fields in stars across the upper main sequence: II. Observed distribution of the magnetic field geometry // Astron. Nachr.—2007.—**328**.—P. 475—490.
 18. Kholtygin A. F., Fabrika S. N., Chountunov G. A., et al. Line profile variability of OB stars: Pulsation, rotation, clumps and magnetic fields // Astron. Nachr.—2007.—**328**.—P. 1170—1172.
 19. Kochukhov O., Bagnulo S. Evolutionary state of magnetic chemically peculiar stars // Astron. and Astrophys.—2006.—**450**.—P. 763—775.
 20. Kudryavtsev D. O., Romanyuk I. I., Elkin V. G., Paunzen E. New magnetic chemically peculiar stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2006.—**372**.—P. 1804—1828.
 21. Landstreet J. D., Silaj J., Andretta V., et al. Searching for links between magnetic fields and stellar evolution III. Measurement of magnetic fields in open cluster Ap stars with ESPaDOnS // Astron. and Astrophys.—2008.—**481**.—P. 465—480.
 22. Leone F. Measuring stellar magnetic fields with the low-resolution spectropolarimeter of the William Herschel Telescope // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2007.—**382**.—P. 1690—1696.
 23. MacGregor K. B., Cassinelli J. P. Magnetic fields in massive stars. II. The buoyant rise of magnetic flux tubes through the radiative interior // Astrophys. J.—2003.—**586**.—P. 480—494.
 24. McSwain M. Detection of magnetic massive stars in the open cluster NGC 3766 // Astrophys. J.—2008.—**686**.—P. 1269—1274.
 25. Monin D. N. Reduction of Zeeman echelle spectra obtained with the SAO 1 m telescope // Bull. Spec. Astrophys. Observ.—1999.—**48**.—P. 121—132.
 26. Monin D. N., Fabrika S. N., Valyvin G. G. Magnetic survey of bright northern main sequence stars // Astron. and Astrophys.—2002.—**396**.—P. 131—141.
 27. Należyty M., Madej J. A catalogue of isolated massive white dwarfs // Astron. and Astrophys.—2004.—**420**.—P. 507—513.
 28. Pasinetti Fracassini L. E., Pastori L., Covino S., Pozzi A. Apparent diameters and absolute radii of stars (CADARS) — Third edition — Comments and statistics // Astron. and Astrophys.—2001.—**367**.—P. 521—524.
 29. Petit V., Wade G. A., Drissen L., et al. Discovery of two magnetic massive stars in the Orion Nebula Cluster: a clue to the origin of neutron star magnetic fields? // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2008.—**387**.—P. L23—L27.
 30. Preston G. W. A statistical investigation of the orientation of magnetic axes in the periodic magnetic variables // Astrophys. J.—1967.—**150**.—P. 547—550.

31. *Preston G. W.* The chemically peculiar stars of the upper main sequence // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1974.—**12**.—P. 257—277.
32. *Schnerr R. S., Henrichs H. F., Neiner C., et al.* Magnetic field measurements and wind-line variability of OB-type stars // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**483**.—P. 857—867.
33. *Silvester J., Neiner C., Henrichs H. F., et al.* On the incidence of magnetic fields in slowly pulsating B, beta Cephei and B-type emission-line stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**398**.—P. 1505—1511.
34. *Spruit H. C.* Differential rotation and magnetic fields in stellar interiors // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**349**.—P. 189—202.
35. *Spruit H. C.* Angular momentum transport and mixing by magnetic fields // *Stellar Rotation: Proc. IAU Symp. N 215, 11—15 November, 2002, Cancun, Yucatan, Mexico / Eds A. Maeder, P. Eenens.* — San Francisco: Astron. Soc. Pacific, 2004.—P. 356—365.
36. *Stibbs D. W. N.* A study of the spectrum and magnetic variable star HD 125248 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1950.—**110**.—P. 395—404.
37. *Schrijvers C., Telting J. H., Aerts C., et al.* Line-profile variations due to adiabatic non-radial pulsations in rotating stars. I. Observable characteristics of spheroidal modes // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1997.—**121**.—P. 343—368.
38. *Zeeman P.* On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance // *Astrophys. J.*—1897.—**5**.—P. 332—347.

Поступила в редакцию 01.10.09