

УДК 524.312.7-337

МАГНИТНЫЕ В-ЗВЁЗДЫ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ. I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2012 И. И. Романюк, И. А. Якунин

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 19 января 2012 года; принята в печать 1 февраля 2012 года

В работе представлен обзор современного состояния проблемы магнетизма массивных звёзд Главной последовательности. Показано, что химически пекулярные Вр-звёзды с усиленными линиями кремния и аномальными линиями гелия в спектрах являются наиболее перспективными объектами для наблюдательной проверки различных механизмов образования и дальнейшей эволюции магнитных полей СР-звёзд. Подготовлен каталог магнитных Вр-звёзд, содержащий 125 объектов. Используя различные критерии, мы составили разнообразные выборки магнитных звёзд, основываясь на которых выполнили анализ магнитных полей у объектов разного возраста. Результаты этого анализа показывают, что у массивных звёзд поле в целом больше во всех изученных выборках, подтверждая результаты, полученные ранее по меньшим выборкам звёзд. Строгой зависимости не наблюдается, разброс параметров отдельных объектов от полученной средней зависимости очень большой. Показано, что наиболее сильные и сложные поля наблюдаются у самых молодых Вр-звёзд, возрастом менее 30 млн лет. В целом, магнитные Вр-звёзды вращаются медленнее нормальных В-звёзд, за исключением наиболее горячих — с усиленными линиями гелия, скорости вращения которых нормальны. Систематических различий в скорости углового вращения между Вр-звёздами с аномальными линиями кремния и гелия не найдено. В работе рассматриваются различные критерии, позволяющие выполнить наблюдательную проверку результатов работы альтернативных механизмов образования и эволюции магнитных полей СР-звёзд, в частности, предлагается количественно сравнивать не только величины полей объектов разного возраста, но и их топологию.

Ключевые слова: *звёзды: химически пекулярные — звёзды: эволюция — звёзды: магнитное поле — звёзды: вращение*

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитные поля в космосе впервые были обнаружены Хэлом [1] в 1908 году при анализе поляризации линий в спектрах солнечных пятен. После трех десятилетий интенсивных, но неудачных попыток найти магнитные поля у других звёзд — успехом закончилась работа Бэбкока, предложившего новую высокоточную методику, основанную на измерении эффекта Зеемана в спектрах, полученных с помощью так называемого дифференциального анализатора круговой поляризации. В 1947 году Бэбкок [2] обнаружил магнитные поля у Ар-звёзд — объектов с аномально сильными линиями некоторых избранных химических элементов. Методика, предложенная Бэбкоком, в различных модификациях сохранилась до наших дней.

В последующие десятилетия были проведены наблюдения многих сотен объектов, имеющих разные физические характеристики и эволюционный статус с целью поиска у них магнитных полей. Вплоть до начала 90-х годов XX века проводились фотографические и фотоэлектрические магнитные

наблюдения, позволявшие получать лишь интегральные характеристики (эквивалентные ширины, доплеровские и зеемановские сдвиги линий в целом и др.). Эти исследования показали, что упорядоченными, постоянными по величине крупномасштабными магнитными полями обладают только Ар/Вр-звёзды Главной последовательности (величиной килогауссы) и малая часть (примерно 5%) белых карликов (величиной мегагауссы).

В последние 20 лет благодаря широкому внедрению ПЗС-матриц в наблюдения значительно повысилась фотометрическая точность получаемых зеемановских спектров, что позволило анализировать не только интегральные параметры линий, но и детали поляризованных профилей. Магнитные поля сложной конфигурации были обнаружены у звёзд солнечного типа и у более холодных объектов, имеются сведения о регистрации полей у звёзд типа Т Тау, Ae/Ве Хербига и некоторых других. Но данных по этим объектам слишком мало для выводов о конфигурации и стабильности их магнитных полей. Поэтому Ар и Вр-звёзды про-

должают оставаться практически единственным надежным источником сведений, необходимых для понимания механизмов возникновения звёздных магнитных полей и построения теории их эволюции на Главной последовательности (ГП).

Магнитные Ар и Вр-звёзды относятся к подклассу так называемых химически пекулярных (СР) звёзд. СР-звёзды составляют около 15% от всех А и В-звёзд ГП, имеют те же температуры, светимости и массы, находятся в том же интервале возрастов, что и нормальные, но обладают аномалиями химического состава атмосферы. Аномалии проявляются в резком усилении линий стронция, хрома, некоторых других металлов и редкоземельных элементов, указывающих на содержание, превышающее нормальное до 3-х порядков. С другой стороны — наблюдается ослабление линий кальция и легких элементов до порядка величины, кроме гелия. Последний может быть как ослаблен, так и усилен. Разные типы СР-звёзд подробно рассмотрены в обзоре Романоука [3].

Ренсон и Манфруа [4] собрали сведения о 8200 химически пекулярных звёздах, примерно половина из которых относится к немагнитным типам — звёздам с усиленными линиями металлов (Am), звёздам с усиленными линиями ртути и марганца (Hg-Mn) и звёздам с ослабленными линиями металлов (типа λ Boo). Вторая половина объектов каталога [4] — это потенциально магнитные Ар/Вр-звёзды. Вероятно, все Ар и Вр-звёзды обладают магнитными полями, но наблюдения с зеемановским анализатором выполнены для менее, чем 10% из них.

Магнитные поля этих объектов очень сильные (величиной до нескольких десятков кГс) и стабильные (не меняются на протяжении десятилетий). Хотя имеются исключения, в целом можно считать, что структура магнитного поля Ар/Вр-звёзд может быть описана в виде комбинации мультиполей низкого порядка, а в большинстве случаев поле просто принимается дипольным.

Вопрос о происхождении магнитных полей Ар/Вр-звёзд не решен. Ни одна из предлагаемых теорий не может полностью объяснить наблюдения. Главная причина этого в том, что при разработке теории приходится делать разного вида допущения и вводить ненаблюдаемые параметры. А результаты работы тех или иных механизмов образования магнитных полей таковы, что получаемое в результате их работы наблюдаемое на поверхности звезды поле мало зависит от заложенных в теории условий. Поэтому очень трудно предложить наблюдательные тесты, позволяющие однозначно определить механизм образования магнитных полей СР-звёзд. Критику различных теорий можно посмотреть во многих публикациях,

например в фундаментальных обзорах Местеля [5] и Мосса [6].

Большинство исследователей отдаёт предпочтение реликтовой теории, согласно которой магнитное поле звезды образовалось вместе с ней путем сжатия намагниченного протозвёздного облака межзвёздного газа. При этом считается, что магнитный поток сохраняется, так как силовые линии поля “вморожены” в вещество. Главный наблюдательный тест для проверки этой гипотезы: в отсутствие генерации поле звезды во время ее жизни на ГП должно уменьшаться с возрастом. Кроме того, должно происходить упрощение его топологии, так как мелкомасштабные структуры распадаются быстрее и у старых звёзд остается только дипольное поле.

Наиболее известная альтернативная теория разрабатывается группой Потсдамских астрофизиков. Она предполагает, что поле постоянно генерируется в ядре звезды, а потом выносится на поверхность и становится наблюдаемым [7]. Доказательством реальности работы этого механизма было бы наличие зависимости величины поля от скорости вращения. Мосс [6] показал, что у СР-звёзд с периодом вращения 1 сутки поле должно быть в 20 раз больше, чем у точно такой же звезды, но с периодом вращения 1 год.

Более подробно данные наблюдений рассмотрим в следующем параграфе. Здесь лишь отметим, что их часто можно истолковать в пользу обеих теорий. В то же время обе теории дают предсказания, часть из которых находятся в противоречии с наблюдениями. Но в теории динамо таких противоречий больше.

Во всех теориях предполагается, что наблюдаемое нами в атмосфере поле адекватно отражает общий магнитный поток от звезды, что далеко не очевидно. Мы считаем, что если какие-то зависимости наблюдаемого поля от возраста звезды или скорости вращения будут получены, то это будет означать, что величина наблюдаемого поля коррелирует с величиной магнитного потока звезды. Отсутствие корреляций не означает, что теории образования магнитных полей неверны. Вполне возможно, что нет строгой зависимости между величиной поля на поверхности и величиной общего магнитного потока звезды.

Таким образом, проблема происхождения и эволюции магнитных полей СР-звёзд продолжает оставаться актуальной и ее решение будет иметь фундаментальное значение.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1. Введение

Несмотря на указанные выше трудности, наблюдательные проверки механизмов образования

и эволюции магнитных полей СР-звёзд следует предпринимать, так как теоретические зависимости величины и структуры полей от возраста, скорости вращения и некоторых других параметров являются различными для случаев динамо и реликтового механизмов.

Обнаружение корреляций между указанными выше параметрами может дать веские аргументы в пользу той или иной теории. Но реализовать практически такую проверку чрезвычайно сложно, из-за малого количества СР-звёзд с измеренными магнитными полями и больших неопределенностей, возникающих при нахождении различных параметров наблюдаемых объектов. Например, при поисках зависимостей между величиной поля и возрастом звёзд следует иметь ввиду очень большие ошибки их определения.

Магнитные поля звёзд определяются с относительно низкой точностью, очень редко лучше 10%, а для большинства Ар/Вр-звёзд имеются только фрагментарные наблюдения (см. например [8]), полученные в случайные фазы периода их вращения. Напомним, что непосредственно в наблюдениях в большинстве случаев измеряется не величина поля на поверхности B_s , а только лишь продольный компонент поля B_e , который меняется при вращении звезды в зависимости от ее пространственной ориентации и конфигурации поля. Для звёзд с малым количеством наблюдений невозможно построить кривые переменности B_e с фазой периода вращения, а значит — найти максимальные либо средние значения поля, что существенно затрудняет сравнение разных звёзд.

Следует также отметить большие неопределенности в нахождении возраста СР-звёзд, особенно если они вычислены по эволюционным трекам. Ландстрит и др. [9] показали, что ошибки при таких вычислениях могут достигать порядка величины. Значительно надежнее и точнее возраст определяется у звёзд — членов рассеянных скоплений. Однако и здесь имеются сложности: необходимо доказывать принадлежность звезды к нему.

Вращение звёзд изучено значительно лучше. Параметры вращения хорошо и надежно определены у звёзд, для которых получены длительные ряды фотометрических наблюдений и спектры с высоким разрешением. Однако, такой наблюдательный материал имеется менее, чем для половины СР-звёзд с измеренными магнитными полями. Проекция скоростей вращения на луч зрения $v \sin i$, определяемые по ширинам линий при использовании низкого разрешения, часто оказываются завышенными, особенно для звёзд с сильными полями, из-за неучёта магнитного уширения линий. Величины $v \sin i$, полученные в разных работах, иногда отличаются в разы, что наглядно видно при сравнении данных из базы VIZIER.

Для определения периодов вращения требуются длительные ряды фотометрических, спектральных или магнитных наблюдений, что весьма затруднительно из-за нехватки времени на телескопах, особенно крупных. Поэтому для большей части магнитных звёзд периоды вращения неизвестны.

Таким образом и величина магнитного поля, и возраст, и, в некоторой степени, параметры вращения магнитных звёзд могут быть определены неточно или неоднозначно, поэтому не следует ожидать хороших корреляций между полем и указанными выше параметрами даже в случае идеального вычисления последствий работы какого-то из механизмов образования и эволюции звёздных магнитных полей.

2.2. Краткий обзор ранее полученных результатов

Первые попытки получить зависимости величины магнитного поля СР-звёзд от их возраста и других физических параметров были предприняты более 30 лет тому назад. Они начали реализовываться после создания бальмеровского магнитометра [10]. На этом приборе Джон Ландстрит и его команда выполнили очень большие серии определений магнитных полей быстровращающихся и горячих звёзд по линиям водорода (см. например, в обзорах [11], [12]). Количество измеряемых линий металлов и их ширина (эти параметры имели решающее значение при предыдущих фотографических определениях поля) уже не играли роли. Рассмотрим основные результаты группы Ландстрита, имеющие отношение к изучаемой нами проблеме.

Борра и Ландстрит [13] открыли очень сильные магнитные поля у группы В-звёзд с усиленными линиями гелия в молодых звёздных скоплениях в Орионе. Магнитные поля этих объектов оказались в среднем в 2–3 раза более сильными, чем поля известных на то время магнитных Ар-звёзд. Так как эти Вр-звёзды были найдены в молодых скоплениях (возрастом менее 10 млн лет), а возраст Ар-звёзд поля превышает сотни миллионов лет, казалось, что найдены надежные доказательства того, что магнитное поле молодых звёзд больше. Тем самым, реликтовая теория получала наблюдательное подтверждение.

Но дальнейшие исследования, выполненные этой группой [14–17], привели авторов к заключению, что нет различий в величине и распределении магнитного поля между выборками горячих массивных В-звёзд молодых скоплений в Орионе и Скорпионе-Центавре (массы от 2.5 до 4.5 M_{\odot}) и старыми Ар-звёздами поля. Авторы пришли к выводу, что имеется только очень слабая (или полностью отсутствует) эволюция магнитного поля СР-звёзд на временной шкале от нескольких миллионов до сотен миллионов лет.

Примерно в это же время в восьмидесятые годы большой цикл наблюдений магнитных Ар/Вр-звёзд в скоплениях и группировках был выполнен на 6-м телескопе БТА. Глаголевский и др. [18] исследовали магнитные поля 68 звёзд в 10 рассеянных скоплениях разного возраста. Сравнение с объектами поля показало возможное слабое падение его величины с увеличением возраста звезды. Было также показано, что магнитное поле звёзд с массами больше $5 M_{\odot}$ в 1.5 раза больше поля звёзд с массами менее $5 M_{\odot}$. Диссипации магнитного поля во время жизни звезды на ГП не найдено.

Было много попыток найти зависимость поля от вращения. Результаты этих исследований достаточно противоречивы, они рассмотрены в обзоре [12]. Здесь отметим лишь, что Романюк [19] подтвердил тренд, найденный Борра и Ландстри-том [14] — уменьшение величины поля с увеличением периода вращения звезды, но эта зависимость оказалась на порядок более слабой, чем следует из расчетов следствий работы механизма динамо в качестве генератора поля у магнитных CP-звёзд. Более того, сильные килогауссные поля обнаружены у нескольких очень медленных ротаторов — например у звезды γ Equ, период вращения которой превышает 80 лет.

Считаем необходимым отметить резонансную работу восьмидесятых годов XX века, результаты которой впоследствии не подтвердились, но ссылки на нее встречаются до настоящего времени.

Стремясь существенно увеличить количество магнитных CP-звёзд, Норт и Крамер [20] оценили магнитные поля 704 CP-звёзд используя свою калибровку результатов фотометрии звёзд в Женевской фотометрической системе. Они сравнили полученные ими “женевские” поля у звёзд разного возраста и получили достаточно сильный тренд — падение поля с возрастом. Этот вывод оказался в хорошем согласии с первым результатом Борра и Ландстри-та [13], что привело многих исследователей к уверенности в том, что найдены достоверные доказательства диссипации поля магнитных CP-звёзд во время эволюции на Главной последовательности.

Однако дальнейший анализ показал, что полученные на основании косвенной эмпирической зависимости “женевские” поля плохо согласуются с реально измеренными по эффекту Зеемана (например, Кудрявцев и др. [21], поэтому их не следует использовать в статистических исследованиях.

Корреляция между величиной поля на поверхности звезды и интенсивностью депрессии на 5200 \AA является слабой, имеются значительные отклонения от средней зависимости [22] для отдельных звёзд.

Интенсивность депрессии сильно зависит от температуры, химического состава и других параметров звезды. Хотя Норт и Крамер постарались учесть все эти факторы, видимо, им это сделать в полной мере не удалось. Полученный авторами тренд мог быть следствием неполной компенсации указанных выше взаимосвязей.

Итак, к началу XXI века вопрос об эволюции магнитных полей CP-звёзд на Главной последовательности не был решен, поэтому возникла необходимость предпринять новые усилия, используя возможности крупнейших телескопов мира.

Для поиска связей между магнитными полями и звёздной эволюцией была предложена большая программа наблюдений на 8-м телескопах ESO. С этой целью спектрограф FORS1 VLT был оборудован поляриметрической приставкой, что позволило искать магнитные поля звёзд до 13 величины. Предполагалось, что доступными для наблюдений станут несколько десятков скоплений и ассоциаций разного возраста, в которых находятся химически пекулярные звёзды.

Первые результаты этих исследований опубликованы в работе Баньюло и др. [23]. Авторами был проведен большой обзор магнитных полей звёзд ранних спектральных классов в рассеянных скоплениях и ассоциациях разного возраста. Магнитные поля были измерены у 235 относительно массивных звёзд с типичной ошибкой около 100 Гс. В этой выборке имеется 97 Ар/Вр-звёзд. Магнитное поле было найдено у 41 объекта, из которых 37 не были известны ранее, как магнитные. Для 138 нормальных А и В-звёзд магнитное поле не было обнаружено.

Результаты наблюдений на FORS1 обобщены в работе Ландстри-та и др. [24]. Для всех магнитных Ар/Вр-звёзд скоплений были найдены эффективные температуры, светимости и массы. Получены следующие выводы: магнитные поля присутствуют по всей ширине полосы ГП от ZAMS до TAMS. Статистически, для звёзд с массами больше $3 M_{\odot}$ на шкале примерно 30 млн лет магнитное поле уменьшается с возрастом примерно так, как ожидалось при сохранении потока с увеличением радиуса звезды, или даже быстрее. Напротив, звёзды меньших масс не показывают никаких признаков уменьшения поля даже на шкале сотен миллионов лет. Авторы делают вывод, что изучение магнитных звёзд в скоплениях — очень мощный метод, но необходимо увеличить точность наблюдений и количество звёзд с измеренными магнитными полями.

Добавим, что наблюдения на спектрополяри-метре FORS1 проводятся с низким спектральным разрешением ($R = 2000$), их результатом является некий усреднённый по всему наблюдаемому спектру сигнал поляризации [23]. Если указанный

сигнал получен исключительно по линиям водорода, то результаты хорошо согласуются с данными, полученными ранее на водородном магнитометре. При поисках магнитных звёзд среди молодых звёзд скопления реализуется именно такой вариант. При использовании линий металлов (доплеровский профиль которых уже инструментального) полученная величина сигнала поляризации переводится в продольное магнитное поле, некий аналог B_e [25]. Процедура оказывается не всегда безупречной, что приводит к большим ошибкам в величине поля, зависящим от температуры, скорости вращения, химического состава и других параметров звезды. Используемый в работах на FORS1 метод является исключительно эффективным при поисках новых магнитных звёзд, но могут возникать трудности при калибровке результатов. Баныоло и др. [23] отмечают, что имеются расхождения с данными классических зеемановских измерений.

Вторая особенность наблюдательного материала, полученного на FORS1 VLT заключается в том, что из-за низкого разрешения по этим спектрам невозможно определить ни химический состав, ни скорости вращения, так как метод изначально был нацелен исключительно на поиски новых магнитных звёзд. Как правило, на FORS1 наблюдались слабые и практически ранее не изученные звёзды рассеянных скоплений, поэтому для определения физических параметров указанных объектов придется получать спектры с более высоким разрешением.

Мы считаем, что необходимо провести новый анализ магнитных полей CP-звёзд, находящихся на разных стадиях эволюции. Для этого следует выполнить новые поиски магнитных звёзд путем проведения наблюдений с зеемановским анализатором и провести новое тщательное рассмотрение уже имеющихся как наших результатов, так и сведений, взятых из литературы.

2.3. Выбор объектов для наблюдений

Для изучения механизмов генерации и эволюции звёздных магнитных полей целесообразно, в первую очередь, рассматривать быстроэволюционирующие объекты — массивные звёзды, обладающие сильными магнитными полями. Относительная точность измерений сильных полей выше, чем слабых, поэтому у объектов с сильными полями более реально выявить систематические особенности, связанные с эволюцией. Поля могут быть разной структуры, что существенно затрудняет их обнаружение и правильное измерение величины у

конкретных объектов. Однако, при изучении достаточно большой выборки массивных звёзд, находящихся на разной стадии эволюции, индивидуальные особенности конкретных объектов не будут иметь решающего значения.

Ниже будет проведен детальный анализ, результаты которого приводят нас к выводу, что наиболее подходящими объектами для исследования эволюции звёздных магнитных полей являются магнитные Вр-звёзды. Мы покажем, что выборка этих объектов уже достаточно большая, что позволяет проводить статистический анализ, а их сильные поля можно измерить относительно точно. Вр-звёзды находят в скоплениях с возрастом от нескольких миллионов до нескольких сотен миллионов лет. Периоды вращения (как правило, от 1 до 20 суток) различаются значительно меньше по сравнению с периодами Ар-звёзд (от нескольких суток до десятков лет). В то же время, хронологические возрасты Ар-звёзд различаются сравнительно мало. Это позволяет отличить эффекты эволюции от эффектов, связанных с вращением.

Поэтому нам представляется правильным зависимости поля от вращения исследовать по Ар-звёздам, а от возраста — по Вр-звёздам.

В цитируемой выше работе Ландстрита и др. [24] показано, что для массивных звёзд (с массой больше $3 M_{\odot}$ — это В-звёзды) имеется тренд — уменьшение поля с возрастом, в то время, как для маломассивных (преимущественно А-звёзд) никакой зависимости с возрастом не отмечено. Выводы этой работы согласуются с нашим предположением: эволюцию магнитных полей на Главной последовательности следует изучать по Вр-звёздам.

Проанализируем современные данные о магнитных полях CP-звёзд разных типов и спектральных классов. В наиболее полном на сегодняшний день каталоге магнитных CP-звёзд Романиюка и Кудрявцева [8] приведена информация о 326-и достоверно обнаруженных магнитных звёздах и 29-и CP-звёздах с заподозренным полем.

Большинство (более 2/3) из них имеют эффективные температуры T_e ниже 10 000 К и относятся к спектральному классу А (Ар-звёзды). Почти все из них находятся в интервале хронологических возрастов от $\log t = 8$ до $\log t = 9$. Магнитные поля на поверхности Ар-звёзд достигают 20 кГс, скорости вращения в 3–4 раза меньше, чем у нормальных А-звёзд. Для них характерны аномалии континуума, особенно выделяется депрессия на 5200 Å, интенсивность которой коррелирует с величиной магнитного поля (Романиук и др. [22]).

Около 1/3 найденных магнитных CP-звёзд относятся к спектральному классу В — так называемые Вр-звёзды. Их эффективные температуры T_e находятся в пределах от 10 000 К до 25 000 К, а

магнитные поля на поверхности достигают 30 кГс и больше. Значительная количество Вр-звёзд найдено в молодых рассеянных скоплениях (в интервале возрастов от $\log t = 6$ до $\log t = 8$). Как правило, это быстрые ротаторы, периоды вращения которых не превышают нескольких суток, Скорости вращения холодных Вр-звёзд в 2–3 раза ниже, чем у нормальных той-же температуры, а горячие объекты с усиленными линиями гелия имеют те же скорости вращения, что и нормальные. Депрессии континуума наблюдаются только у самых холодных Вр-звёзд, имеющих T_e не более 12 000 К.

Для полноты картины укажем, что слабые магнитные поля (величиной несколько сот Гс) были обнаружены у некоторых О-звёзд (например, [26]). Но полученные данные малочисленны, что не позволяет использовать их в статистических вычислениях.

3. МАГНИТНЫЕ ВР-ЗВЁЗДЫ

3.1. Каталог магнитных Вр-звёзд

Выделим магнитные В-звёзды из каталога Романюка и Кудрявцева [8]. Мы отобрали их используя 2 критерия: 1) спектральный класс В и тип пекулярности (по каталогу [4]) и 2) эффективная температура (T_e более 10 000 К). Спектральная классификация не является количественным параметром, оценки для пекулярных звёзд часто бывают неоднозначными. Можно встретить в разных статьях классификацию одной и той же звезды как Ар, так и Вр.

Поэтому в качестве второго критерия была выбрана эффективная температура — объекты с T_e выше 10 000 К будем считать Вр-звёздами даже в том случае, если в каталоге Ренсона и Манфруа [4] они классифицированы как Ар.

В отличие от нормальных звёзд, где температуры, полученные разными методами, согласуются между собой, для пекулярных звёзд картина иная. Мы не будем анализировать многочисленные результаты определений эффективной температуры T_e , имеющихся в литературе. Отметим только, что все доступные нам сведения о температурах магнитных СР-звёзд собраны в базе данных [19].

Укажем, что T_e ярких Вр-звёзд определялись по многу раз, и данные разных авторов часто значительно различаются. В таких случаях здесь мы отдаем предпочтение результатам, полученным по спектрам с более высоким разрешением.

Значительная доля магнитных В-звёзд из каталога Романюка и Кудрявцева изучена плохо,

имеются лишь грубые оценки температур, вычисленные по показателям цвета. В дальнейшем будет необходимо получить спектральный материал для оценки их температур, скоростей вращения и других физических параметров.

В данной работе сведения об эффективной температуре T_e мы используем лишь в качестве критерия для включения звезды в список магнитных Вр-звёзд. Поэтому здесь мы ограничимся указанием на то, что эффективные температуры были взяты из нашей базы данных о магнитных звёздах [19]. В ней величины T_e в основном собраны из обширных списков Глаголевского [27] либо Кочухова и Банныюло [28]. Отметим хорошее совпадение температур звёзд, общих для обоих списков.

В случае отсутствия звезды в указанных работах, использовались другие источники, содержащиеся в базе данных VIZIER. Однако, считаем необходимым отметить, что к данным, помещенным в VIZIER, следует относиться критически. Например, эффективные температуры почти всех объектов из нашего списка Вр-звёзд приведены в работе [29]. Сравнение с другими авторами по общим объектам показывает, что в указанной работе эффективные температуры пекулярных В-звёзд сильно занижены, особенно для объектов с аномальными линиями гелия, где разница доходит до 5–6 тысяч градусов. Так как методика, предложенная в указанной работе, явно не подходит для определения эффективных температур пекулярных В-звёзд, мы не считаем возможным использовать эти сведения в дальнейшем.

В Таблице 1 приведен список магнитных Вр-звёзд, выделенных нами из каталога [8]. В колонках таблицы помещены: обозначение звезды, среднее квадратическое магнитное поле $\langle B_e \rangle$ и ошибка его измерений σ , экстремальная величина продольной компоненты $B_e(\text{extr})$, эффективные температуры T_e , спектральный класс Sp и тип пекулярности Pec. Объекты расположены в порядке возрастания прямых восхождений объектов.

Итак, мы выделили 125 магнитных В-звёзд, что составляет 35.2% от общего количества объектов в каталоге [8]. Из них 52 — имеют пекулярность Si, 33 — He-wk, 18 — Si+, 9 — He-r и 13 — другие. В сумме, звёзды с усиленными линиями кремния составляют 56% списка, а звёзды с аномальными линиями гелия — 34%. Ссылки на первоисточники сведений о магнитных полях можно найти в указанном выше каталоге.

Таблица 1. Магнитные В-звёзды

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	T_e , К	Sp	Рес
HD 315	1520 ± 680	$-1600 / +2000$	12 600	B9	Si
HD 5737	324 ± 142	$-400 / +500$	13 700	B6	He-wk
HD 8855	400 ± 180	$-600 / +270$	12 550	A0	SiCr
HD 16582	1068 ± 300	$-2300 / +300$	23 000	B2	He-r, β Cep?
HD 19712	2510 ± 250	$-3800 / +1900$	11 300	B9	CrEu
HD 19832	314 ± 223	$-350 / +380$	12 600	B8	Si
HD 21590	1100 ± 460	$-100 / +1600$	12 600	B9	Si
HD 21699	828 ± 398	< 1000	16 400	B8	He-wk
HD 22470	733 ± 408	$-1100 / +1200$	13 400	B8	Si, He-wk
HD 22920	307 ± 159	$+200 / +400$	14 850	B8	Si, He-wk
HD 24155	803 ± 170	$-440 / +1660$	13 800	B8	Si
HD 25823	668 ± 470	$-100 / +1200$	12 900	B9	SrSi
HD 27309	1755 ± 602	$-4000 / +200$	12 260	A0	SiCr
HD 28843	345 ± 240	$-500 / +250$	14 500	B9	He-wk, Si
HD 29009	360 ± 150	$-450 / +650$	12 900	B9	Si
HD 29925	820 ± 250	$-1400 / -200$	12 100	B9	Si
HD 32145	2900 ± 290	$-2100 / +2400$	13 200	B7	Si
HD 32633	2760 ± 260	$-5700 / +3500$	12 500	B9	SiCr
HD 34452	743 ± 434	$-300 / +100$	15 650	B9	Si
HD 34797		$+713$	11 700	B8	He-wk, Si
HD 34719	880 ± 220	$-500 / +1300$	12 200	A0	SiCrEu
HD 35008		-340	13 200	B9	Si
HD 35298	2275 ± 444	$-2810 / +2920$	15 200	B6	He-wk
HD 35456	615 ± 120	$-300 / +1080$	14 900	B7	He-wk
HD 35502	1490 ± 140	$-2250 / -180$	16 400	B6	He-wk, SrCrSi
HD 36313	1020 ± 450	$-1500 / -1100$	10 400	B8	He-wk, Si
HD 36429	425 ± 170	$-840 / +160$	17 200	B6	He-wk
HD 36485	3220 ± 318	$-3700 / -1900$	18 000	B2	He-r
HD 36526	2130 ± 200	$-980 / +3400$	16 400	B8	He-wk, Si
HD 36540	470 ± 220	$-400 / +1030$	15 800	B7	He-wk
HD 36629	440 ± 270	$-1300 / +1100$	20 300	B3	He-wk
HD 36668	900 ± 100	$-1590 / +1320$	12 800	B7	He-wk, Si
HD 36916	500 ± 125	$-640 / -500$	12 950	B8	He-wk, SiMn
HD 37017	1490 ± 330	$-2300 / -300$	20 450	B2	He-r

Таблица 1. (Продолжение)

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	T_e , К	Sp	Рес
HD 37058	1090 ± 412	-880 / +1000	19 600	B3	He-wk
HD 37140	450 ± 290	-1050 / +400	15 800	B8	He-wk, SiSr
HD 37479	1980 ± 155	-1600 / +3500	22 500	B2	He-r
HD 37642	2100 ± 180	-3000 / +3000	15 200	B9	He-wk, Si
HD 37776	1260 ± 385	-2000 / +2000	23 050	B3	He-r
HD 43819	560 ± 100	+170 / +740	10 050	B9	Si
HD 45583	2880 ± 600	-2500 / +3800	12 900	B9	Si
HD 258586	6000 ± 320	+5100 / +7900	12 960	B8	Si
NGC 2244-334	6000 ± 320	-6200		B5	He-wk
HD 47756	420 ± 120	-600 / +100	12 600	B8	SiCrSr
HD 49333	618 ± 300	-800 / +800	16 500	B7	He-wk, Si
HD 49606	916 ± 557	-1500 / -100	13 800	B8	HgMnSi
HD 49713	2560 ± 460	-2880 / +2200	11 300	B9	SiCrEu
HD 50461	1500 ± 700	-2800 / +2200	10 500	B9	SiCr
HD 53081	450 ± 100	-600 / +600	10 400	B9	Si
HD 55522	500 ± 100	+38 / +873	16 200	B3	He-var
HD 56343	3000 ± 70	-3100	10 400	B9	
HD 58260	2290 ± 300	-2000 / +2600	19 000	B2	He-r
HD 61045	310 ± 80	-160 / +470	13 000	B8	Si
HD 63401	400 ± 80	-650 / +340	10 850	B8	Si
NGC 2489-40	2000 ± 140	-450		B8	
HD 64740	565 ± 114	-870 / +530	24 100	B2	He-r
HD 65987	500 ± 70	-460 / +600	10 200	B9	SiSr
HD 66295	400 ± 50	-530 / +440	10 000	B9	Si
HD 66522	700 ± 350	-80 / +1000	19 500	B2	He-r
HD 69067	450 ± 50	+500 / +530	10 500	B8	Si
HD 70331	2800 ± 184	-3000 / -2000	13 200	B8	Si
HD 73340	1644 ± 218	-2300 / -900	14 300	B8	Si
HD 74168	330 ± 100	-437		B9	Si
HD 78316	208 ± 205	-640 / +460	13 200	B8	HgMn?
HD 79158	672 ± 226	-1200 / +900	13 000	B8	He-wk
HD 86199	850 ± 67	-921	11 000	B9	Si
HD 89103	2250 ± 50	-2303	11 000	B9	Si
HD 90044	740 ± 373	-800 / +700	10 400	B9	SiCrSr

Таблица 1. (Продолжение)

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	T_e , К	Sp	Рец
HD 92385	450 ± 55	-519	10 200	B9	Si
HD 92664	803 ± 100	-1300 / -100	14 500	B9	Si
HD 96729	900 ± 50	+949		B9	Si
HD 98340	900 ± 70	+977	10 700	B9	Si
HD 105362	600 ± 100	-920 / -430	16 300	B5	He-wk
HD 105770	200 ± 80	+150 / +260	13 000	B9	Si
HD 109026	342 ± 95	+140 / +470	16 050	B5	He-wk
HD 112413	1350 ± 200	+140 / +470	11 900	B9	SiCrEuHg
HD 115440	3100 ± 75	+3120	12 200	B9	Si
HD 122532	665 ± 268	-900 / +900	11 800	B9	Si
HD 124224	570 ± 323	-437 / +811	12 400	B9	Si
HD 125823	470 ± 253	-440 / +370	19 500	B3	He-wk
HD 127575	730 ± 70	+807	12 000	B9	Si
HD 128775	300 ± 60	-340	12 200	B9	Si
HD 133029	2420 ± 320	+1300 / +3300	11 000	B9	SiCrSr
HD 133652	1100 ± 200	-2100 / +700	13 300	B9	SiCr
HD 133880	2415 ± 240	-4400 / +1920	11 300	B9	Si
HD 137193	680 ± 220	+230 / +970	11 000	B9	Si
HD 137509	1020 ± 416	-1200 / +2200	14 000	B8	SiCrFe
HD 138758	360 ± 50	+415	10 500	B9	Si
HD 138769	150 ± 70	-260 / -20		B3	He-wk
HD 142301	2100 ± 420	-4100 / +1600	17 300	B4	He-wk
HD 142884	950 ± 120		15 000	B9	Si
HD 142990	1300 ± 255	-2500 / +600	17 800	B5	He-wk
HD 143474	4292 ± 362	+4200 / +5100	12 850	B9	Si
HD 144334	783 ± 257	-1400 / +500	15 150	B8	He-wk
HD 144661	542 ± 318	-400 / +1100	15 700	B8	He-wk
HD 145501	1240 ± 238	-1480 / +1190	15 100	B9	He-wk
HD 146001	647 ± 382	-200 / +1300	13 700	B8	He-wk
HD 147010	4032 ± 402	-4500 / -2500	12 850	B9	SiSrCr
HD 149277	2000 ± 105	+2200		B2	pec
CD -48°11051	1808 ± 100	-2010 / -1780		B1	He-r
HD 151965	2602 ± 282	-3700 / -550	14 700	B9	Si
HD 159545	310 ± 110	-360 / -150	11 550	B9	Si

Таблица 1. (Продолжение)

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	T_e , К	Sp	Рес
HD 168733	815 ± 276	-1000 / -400	14 300	B7	He-wk
HD 170000	350 ± 150	-180 / +640	11 650	B9	Si
HD 170836	490 ± 140	-700 / +300	13 480	B7	p
HD 175362	3570 ± 440	-5000 / +7000	17 080	B3	He-wk
HD 343872	2930 ± 320	-700 / +4500	11 780	B8	Si
HD 179761	480 ± 240	-590 / +170	11 900	B8	Si
HD 338226	1080 ± 195	+440 / +1490	10 500	B9	Si
HD 183339	1296 ± 465	-1600 / +1800	13 900	B8	He-wk
HD 184927	1465 ± 430	-1200 / +3000	21 500	B2	He-r
HD 196178	973 ± 238	-1500 / -700	13 400	B9	Si
HD 196606	900 ± 200	-1110 / +1040	12 000	B8	Si
HD 199728	400 ± 200	-470 / +720	12 000	B9	Si
HD 200311	1490 ± 430	-1800 / +1800	13 000	B9	SiCrHg
HD 207188	1220 ± 310	-1510 / +1000	12 300	B9	Si
HD 213918	1730 ± 200	> +2000	15 900	B7	SiSr
HD 215441	17500 ± 500	+10000 / +20000	15 900	B5	Si
HD 217833	3000 ± 500	-6200 / -1500	16 000	B8	He-wk
HD 221006	2000 ± 200	+410 / +990	13 400	B9	Si
HD 221936	2000 ± 200	-2500 / +2900	10 000	B9	Si
HD 223640	643 ± 218	-20 / +820	12 300	B9	Si
HD 224801	1320 ± 380	+250 / +2270	11 800	B9	SiCrEu

Сравним магнитные поля выделенных нами Вр-звёзд и Ар-звёзд из каталога [8]. Гистограмма распределения величины $\langle B_e \rangle$ для них продемонстрирована на Рис. 1.

Так как для большинства объектов каталога [8] получено малое количество измерений в случайные фазы периода вращения, среднеквадратическое поле $\langle B_e \rangle$ является наиболее приемлемым параметром для сравнительного анализа из-за большей устойчивости, чем, например, экстремальное значение поля.

Большинство объектов в каталоге [8] составляют Ар-звёзды. Функция распределения величины $\langle B_e \rangle$ всех известных магнитных Ар-звёзд приведена на Рис. 1а. Средняя величина продольной компоненты: $\overline{\langle B_e \rangle} = 1005$ Гс.

Функция распределения величины $\langle B_e \rangle$ Вр-звёзд из Таблицы 1 приведена на Рис. 1б.

Средняя величина продольной компоненты для Вр-звёзд: $\overline{\langle B_e \rangle} = 1432$ Гс.

Сравнение выборок по методу Колмогорова-Смирнова показывает, что магнитное поля Вр-звёзд больше, чем у Ар-звёзд, уровень значимости высокий (тест Колмогорова-Смирнова: p-value = 0.069, тест Манна-Уитни: p-value = 0.005). По критериям распределения Стьюдента достоверность различий средних составляет 97%.

Таким образом, мы видим, что значительное увеличение количества наблюдательных данных не привело к изменению давно известной закономерности: магнитное поле горячих и массивных звёзд в целом примерно в 1.4 раза больше, чем холодных. Статистическая надежность полученного вывода достаточно высокая (от 93% до 99.5% — при использовании различных критериев).

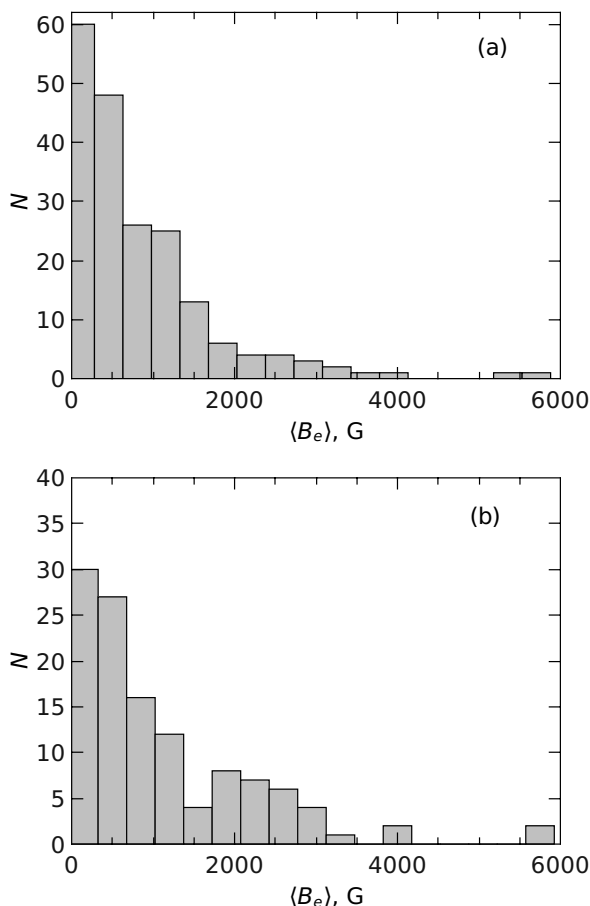


Рис. 1. Гистограмма распределения величины $\langle B_e \rangle$ для Ar (a) и Vr-звёзд (b).

Однако, нельзя считать, что найдена общая для всех магнитных звёзд закономерность, так как различия полей отдельных объектов очень велики. Распределение по величине магнитного поля крайне неоднородно и для Vr, и для Ar-звёзд. В последние годы были обнаружены несколько холодных Ar-звёзд с очень сильными магнитными полями, величина которых превышает 20 кГс на поверхности, например, HD 178892 (Кудрявцев и др. [21]), HD 154708 (Хубриг и др. [30]) и другие. Возраст HD 178892 составляет 730 млн лет [31], что указывает на хронологически старую звезду. Кочухов и Баньюло [28] вычислили возраст HD 154708 $\log t = 9.29$, а Куртц и др. [32] нашли у нее быстрые пульсации, характерные для самых холодных и маломассивных Ar-звёзд. Таким образом, мы видим, что имеются несомненные доказательства того, что старые маломассивные звёзды могут обладать очень сильными магнитными полями.

Вторая трудность при сравнительном анализе магнитных полей Ar- и Vr-звёзд заключается в том, что для большей части объектов из списка [8] выполнено не более 4–5 измерений в случайные фазы периода вращения, а недавно открытые на FORS1 VLT магнитные звёзды в скоплениях [23] наблюдались и того меньше, всего по 1–2 раза.

Так как продольная компонента поля B_e меняется с фазой вращения звезды, среднеквадратические поля $\langle B_e \rangle$ и экстремумы продольной компоненты $B_e(\text{extr})$ различных объектов невозможно сравнивать между собой при малом числе наблюдений, так как они будут меняться с изменением количества измерений.

Нахождение какого-либо “истинного” поля, например, поля на полюсе диполя B_p , которое можно было бы сравнивать для разных звёзд, требует моделирования, основанного на анализе кривой переменности продольной компоненты поля с привлечением других физических параметров исследуемого объекта. Такое моделирование проведено для относительно небольшого числа звёзд, что недостаточно для статистического анализа. Кроме того, оно не отличается высокой точностью.

Рассмотрение вопроса о моделировании требует отдельной статьи. Здесь мы решили сравнить средние магнитные поля звёзд, для которых имеется достаточно большое количество измерений. При этом мы учитываем, что некоторые объекты с экстремальными полями или другими уникальными свойствами могут не попасть в наш список из-за малого количества выполненных для них измерений поля.

3.2. Объекты с надёжно измеренными полями

Наш анализ показывает, что величины $\langle B_e \rangle$ и $B_e(\text{extr})$, характеризующие магнитное поле, становятся устойчивыми и практически не изменяются, если проведено не менее 8–10 наблюдений, покрывающих весь период вращения звезды.

В качестве компромисса, позволяющего, с одной стороны, отобрать достаточное количество звёзд для статистических исследований, а с другой — обеспечить возможность сравнения магнитного поля разных звёзд, мы выбрали для дальнейшего анализа объекты, для которых выполнено не менее 8 измерений B_e . Список магнитных CP-звёзд разного спектрального класса и возраста, для которых выполнено достаточно измерений, выделен из каталога [8] и представлен в Таблице 2.

Таблица 2. Магнитные CP-звёзды, для которых выполнено не менее 8 измерений B_e

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	Sp	Печ	$\log t$
HD 965	400 ± 50	-400 / +600	A8	SrCrEu	
HD 2453	588 ± 202	-1030 / -250	A1	SrCrEu	8.72
HD 3980	1200 ± 200	-1600 / +2000	A7	SrCrEu	8.83
HD 4778	1026 ± 454	-1100 / +1400	A1	SrCrEu	8.26
HD 5737	324 ± 142	-400 / +500	B6	He-wk	7.97
HD 6757A	2730 ± 160	+2300 / +2900	A0	CrEuSi	
HD 8441	284 ± 227	-750 / +400	A2	Sr	8.66
HD 9996	833 ± 174	-1700 / +600	B9	CrEuSi	8.41
HD 10783	1269 ± 260	-1200 / +1800	A2	SiSrCr	8.51
HD 11503	545 ± 344	-900 / +410	A1	SiCrSr	8.47
HD 12288	1643 ± 150	-3100 / -200	A2	CrSi	8.54
HD 12447	365 ± 266	-510 / +430	A2	SiSrCr	8.41
HD 14437	1829 ± 260	-2000 / -800	B9	CrEuSi	8.36
HD 15144	802 ± 216	-1100 / -530	A5	SrCrEu	8.63
HD 18078	800 ± 100	-850 / +1200	A0	SrCr	
HD 18296	440 ± 216	-1000 / +1350	A0	SiCr	8.38
HD 19712	2510 ± 250	-3800 / +1900	B9	CrEu	6.74
HD 19832	315 ± 233	-350 / +380	B8	Si	7.95
HD 22316	1250 ± 348	-2200 / +600	B9	CrHgSi	8.24
HD 22470	733 ± 408	-1100 / +1200	B9	He-wk	8.10
HD 24155	803 ± 170	-440 / +1660	B9	Si	7.30
HD 24712	802 ± 171	-200 / +1600	A9	SrCrEu	9.07
HD 25823	668 ± 470	-100 / +1200	B9	SrSi	8.13
HD 27309	1755 ± 602	-4000 / -200	A0	SrSi	8.07
BD -01°709	300 ± 100	-600 / +800	F0	SrEu	
HD 30466	1464 ± 293	+1000 / +2200	A0	Si	8.21
HD 293764	3760 ± 220	+2600 / +4200	A2	SrCrEu	7.3
HD 32633	2760 ± 263	-5700 / +3500	B9	SiCr	6.39
HD 34452	743 ± 434	-300 / +100	B9	Si	7.82
HD 34719	880 ± 220	-500 / +1200	A0	SiHgCrEu	7.5
HD 37017	1490 ± 338	-2300 / -300	B2	He-r	6.4
HD 37479	1980 ± 155	-1600 / +3500	B2	He-r	6.6
HD 37642	2100 ± 180	-3000 / +3000	B9	He-wk	6.4
HD 37776	1260 ± 385	-2000 / +2000	B3	He-r	6.6

Таблица 2. (Продолжение)

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	Sp	Пес	$\log t$
HD 40312	340 ± 60	$-240 / +360$	A0	Si	8.36
HD 41403	330 ± 150	$-500 / +450$	B9	SrCrEu	
HD 42605	200 ± 40	$-450 / +100$	A3	SrCrEu	
HD 45583	2880 ± 600	$-2500 / +3800$	B9	Si	7.30
HD 258686	6000 ± 320	$+5100 / +7900$	B8	Si	8.36
HD 47103	3326 ± 365	$-4000 / -3000$	A8	SrEu	
HD 49333	618 ± 300	$-800 / +800$	B7	He-wk	7.27
HD 49606	916 ± 557	$-1500 / -100$	B8	HgMnSi	
HD 49976	1490 ± 360	$-2000 / +2200$	A1	SrCrEu	8.45
HD 50169	1220 ± 220	$-1500 / +2000$	A3	SrCrEu	
HD 51418	401 ± 200	$-200 / +750$	A0	HoDy	
HD 55719	1400 ± 264	$-1040 / +2100$	A3	SrCrEu	8.67
HD 58260	2290 ± 300	$+2000 / +2600$	B2	He-wk	7.41
HD 59435	800 ± 50	$-1200 / +900$	A4	SrCrSi	
HD 62140	1336 ± 306	$-2200 / +3200$	F0	SrEu	8.90
HD 64740	565 ± 114	$-870 / +530$	B2	He-r	7.10
HD 65339	3200 ± 400	$-5400 / +4200$	A2	SrCrEu	8.84
HD 71866	1680 ± 236	$-2000 / +2000$	A1	SiSrEu	8.74
HD 72968	480 ± 288	$-700 / +500$	A1	SrCr	8.43
HD 74521	812 ± 141	$-200 / +1400$	A1	SiCrEu	8.42
HD 78316	208 ± 205	$-640 / +460$	B8	HgMn??	
HD 79158	672 ± 266	$-1200 / +900$	B8	He-wk	8.16
HD 81009	1438 ± 236	$-100 / +2500$	A3	CrSiSr	8.90
HD 83368	576 ± 264	$-800 / +800$	A8	SrCrEu	9.02
HD 90569	192 ± 58	$-230 / +400$	A0	SiCrEu	8.50
HD 92664	803 ± 40	$-1300 / -100$	B9	Si	7.84
HD 94660	2352 ± 265	$-3300 / -1800$	A0	EuCrSi	8.42
HD 96446	1105 ± 248	$-2100 / -1100$	B2	He-r	6.46
HD 96707	1070 ± 722	$-3900 / +800$	F0	Sr	8.87
HD 98088	802 ± 284	$-1200 / +1000$	A8	SrCrEu	8.85
HD 103498	333 ± 138	$-630 / +250$	A1	CrEuSr	
HD 108662	620 ± 200	$-1150 / +550$	A0	SrCrEu	8.42
HD 110066	204 ± 50	$-370 / +300$	A1	SrCrEu	8.71
HD 111133	806 ± 143	$-1500 / +500$	A1	SrCrEu	8.55

Таблица 2. (Продолжение)

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	Sp	Печ	$\log t$
HD 112185	365 ± 60	-50 / +150	A0	Cr	8.61
HD 112413	1350 ± 200	-1400 / +1600	B9	SiCrEuHg	8.27
HD 115708	927 ± 405	-1500 / +900	A3	SrCrEu	8.97
HD 116114	1923 ± 113	-2200 / -1800	F0	SrCrEu	9.01
HD 116458	1925 ± 273	-2200 / -1300	A0	SiEuCr	8.48
HD 118022	808 ± 225	-1800 / -200	A1	SrCrEu	8.66
HD 119213	1220 ± 440	-500 / +1200	A4	CrEuSr	8.69
HD 119419	1770 ± 455	-4200 / +1800	A0	SiCrEu	7.73
HD 120198	705 ± 337	-1300 / +200	B8	EuCr	8.20
HD 122532	665 ± 268	-900 / +900	B9	Si	8.27
HD 124224	570 ± 323	-437 / +811	B9	Si	7.97
HD 125248	1505 ± 295	-2500 / +2800	A1	CrEu	8.37
HD 125823	470 ± 253	-440 / +370	B3	He-wk	7.51
HD 126515	1720 ± 323	-2000 / +2000	A2	CrSr	8.07
HD 133029	2420 ± 319	+1300 / +3300	B9	SiCrSr	8.41
HD 133652	1110 ± 200	-2100 / +700	B9	SiCr	6.39
HD 133880	2415 ± 241	-4400 / +1920	B9	Si	8.15
HD 134214	458 ± 150	-800 / -200	F2	SrCrEu	9.05
HD 134793	770 ± 250	-800 / +900	A4	SrCrEu	
HD 137509	1026 ± 416	-1200 / +2200	B8	SiCrFe	7.89
HD 137909	750 ± 100	-900 / +1000	F0	SrCrEu	8.95
HD 137949	1500 ± 120	+980 / +1220	F0	SrCrEu	9.07
HD 140160	820 ± 712	-1840 / +760	A0	SrCr	8.62
HD 142070	400 ± 60	-700 / +600	A0	SrCrEu	
HD 142990	1304 ± 255	-2500 / +600	B5	He-wk	7.54
HD 144334	783 ± 257	-1400 / +500	B5	He-wk	7.72
HD 147010	4032 ± 402	-4500 / -2500	B9	SiCrSr	6.47
HD 148112	650 ± 441	-250 / -90	B9	SrCrEu	8.63
HD 148330	304 ± 154	-600 / +200	A2	SiSr	8.71
HD 151965	2602 ± 282	-3700 / -550	B9	Si	7.68
HD 152107	1487 ± 250	+500 / +2000	A2	SrCrEu	8.74
HD 153882	1750 ± 562	-1800 / +3100	B9	SrCrEu	8.55
HD 165474	470 ± 100	-100 / +900	A7	SrCrEu	8.99
HD 168733	815 ± 276	-1000 / -400	B7	He-wk	8.12

Таблица 2. (Продолжение)

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	Sp	Печ	$\log t$
HD 170397	615 ± 252	$-650 / -870$	A0	SiCrEu	7.70
HD 173650	326 ± 275	$-500 / +700$	B9	SiCrSr	8.44
HD 349321	2700 ± 300	$-4400 / +1900$	B9	Si	
HD 175362	3570 ± 448	$-5000 / +7000$	B3	He-wk	6.92
HD 178892	5410 ± 470	$+2100 / +7200$	A0	SrCrEu	8.91
HD 343872	2930 ± 320	$-700 / +4500$	B8	Si	
HD 184927	1465 ± 430	$-1200 / +3000$	B2	He-r	6.85
HD 187474	1488 ± 143	$-1800 / +1800$	A0	CrEuSi	8.52
HD 188041	1100 ± 200	$-200 / +1500$	A6	SrCrEu	8.80
HD 192678	1410 ± 160	$+1000 / +1800$	A4	Cr	8.59
HD 196178	973 ± 238	$-1500 / -700$	B9	Si	7.99
HD 196502	490 ± 200	$-700 / -200$	A0	SrCrEu	8.57
HD 335238	1738 ± 247	$-3040 / +1260$	A0	SrCrEu	
HD 200311	1490 ± 427	$-1800 / +1800$	B9	SiCrHg	
HD 201601	600 ± 100	$-1100 / +600$	F0	CrEu	8.99
HD 205087	500 ± 200	$-200 / +800$	B9	SiSrCrEu	8.39
HD 215441	17500 ± 500	$+10000 / +20000$	B5	Si	
HD 217833	3000 ± 500	$-6200 / -1500$	B8	He-wk	8.82
HD 220825	269 ± 247	$-430 / +190$	A0	SrCr	8.57
HD 221936	2000 ± 200	$-2500 / +2900$	B9	Si	8.45

В колонках Таблицы 2 приведены: среднеквадратическое поле $\langle B_e \rangle$ и экстремальное значение продольной компоненты $B_e(\text{extr})$ (из работы [8]), спектральный класс и тип пекулярности (из каталога [4]). Возраст звёзд рассеянных скоплений ($\log t$) был взят равным возрасту соответствующего скопления (найден в базе данных WEBDA). Для звёзд поля величины $\log t$ взяты из работы [28]: в ней они вычислялись по смоделированным эволюционным трекам. Возраст нескольких объектов был найден в других источниках, помещённых в базу данных VIZIER.

Таким образом, достаточно большое (не менее 8) количество измерений поля выполнено для 122 Ap/Bp-звёзд, что составляет 34% от всех магнитных звёзд, имеющих в каталоге Романиюка и Кудрявцева [8].

Возраст $\log t$ был взят из литературных источников для 102 объектов (83.6% от общего количества). Мы считаем, что уже имеется достаточно

надёжная база, позволяющая приступить к поиску различных статистических зависимостей, необходимых для выбора вариантов эволюции магнитного поля. Возраста оценены для 56 Ap-звёзд (в том числе и для 8 наименее массивных F-звёзд) и для 46 объектов класса Bp. Информация о возрасте отсутствует для 6 Bp и 14 Ap-звёзд.

Доля Bp-звёзд в Таблице 2 составляет 42%, что несколько больше, чем в каталоге [8], где она составляет 35%. Различия между указанными величинами несущественные, и это означает, что процент магнитных звёзд с достаточно большим количеством измерений поля примерно одинаков для всех типов CP-звёзд, предпочтений в наблюдениях избранных звёзд каким-либо спектральным подклассам или типам пекулярностей не отдавалось.

В Таблице 2 оказались 14 звёзд с усиленными линиями кремния (подтип Si), 15 — подтипа Si+, 12 — с ослабленными линиями гелия (He-wk), и

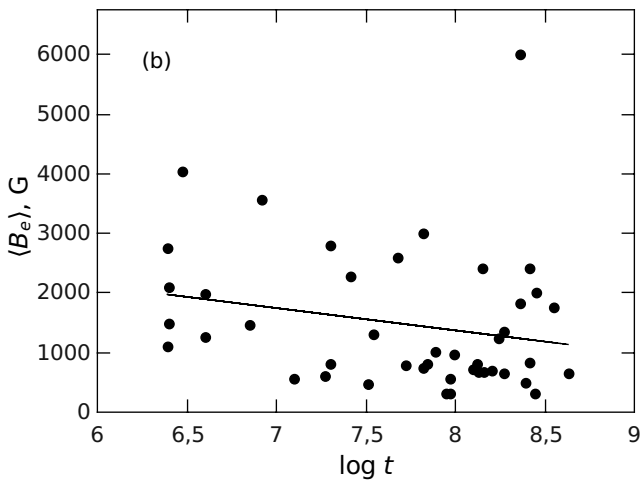
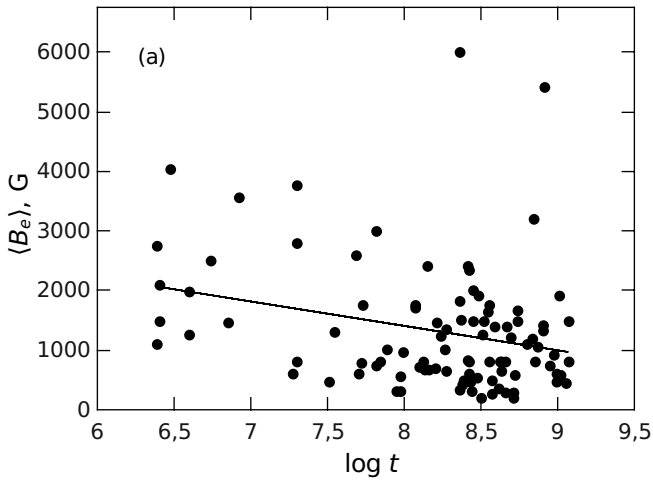


Рис. 2. Зависимость величины магнитного поля от возраста. (а) Все звёзды, (б) Вр-звёзды.

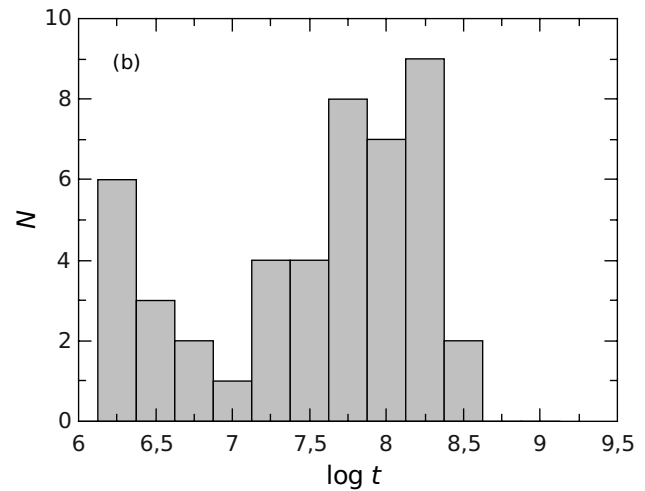
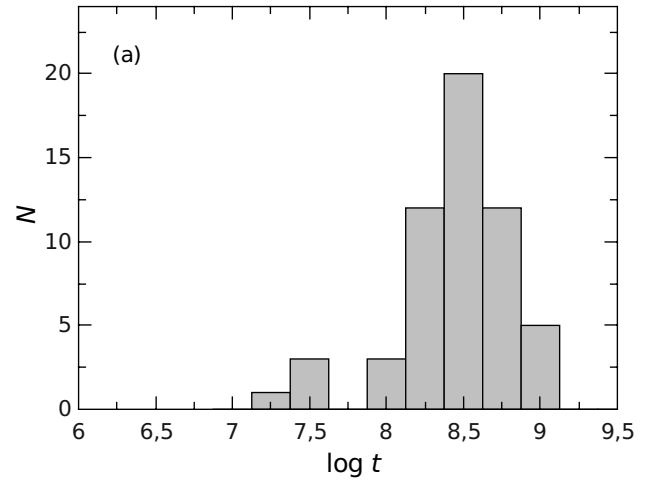


Рис. 3. Гистограмма распределения возрастов для Ар (а) и Вр-звёзд (б).

6 — с усиленными линиями гелия (He-г). Пропорции аналогичны тем, какие наблюдаются в полном списке 125 магнитных Вр-звёзд.

Посмотрим, улучшится ли корреляция магнитного поля с возрастом при условии, что в анализе будут учитываться только звёзды с надёжно измеренными полями (из Таблицы 2).

Зависимость величины поля $\langle B_e \rangle$ для Ар и Вр-звёзд продемонстрирована на Рис. 2.

На Рис. 2а приведена зависимость величины среднеквадратического продольного поля от возраста для 102 Ар/Вр-звёзд из Таблицы 2. На Рис. 2б представлена аналогичная зависимость только для 46 Вр-звёзд.

На Рис. 2 виден слабый тренд — уменьшение поля с возрастом, но наблюдается большая дисперсия величин магнитных полей звёзд одинакового возраста. Кроме того, наблюдается повышенная

концентрация Ар-звёзд в интервале возрастов $\log t$ от 8.0 до 9.0 (Рис. 2а).

Построим гистограмму распределения абсолютных (хронологических) возрастов Ар/Вр-звёзд. Она продемонстрирована на Рис. 3.

Обращает на себя внимание, что большинство (69%) магнитных Ар-звёзд из Таблицы 2 расположены в узком интервале возрастов $\log t = 8.20\text{--}8.90$ (Рис. 3а). Среднее значения возраста звёзд выборки:

$$\langle \log t \rangle = 8.57.$$

Только 4 Ар-звёзды из 56 имеют возраст $\log t < 8.0$ (или 7.1%), и нет ни одной с возрастом $\log t < 7.0$.

Совсем другая картина наблюдается для Вр-звёзд. Видим, что они расположены в широком интервале возрастов от $\log t = 6.4$ до $\log t = 8.5$ без явно выраженного пика (Рис. 3б). Среднее

значения возраста нашей выборки магнитных Вр-звёзд:

$$\langle \log t \rangle = 7.65.$$

Статистические тесты показывают, что распределение возрастов Ар/Вр-звёзд нашей выборки различаются с очень высоким уровнем достоверности: (тест Колмогорова-Смирнова: $p\text{-value} = 3.894 \times 10^{-11}$, тест Мунна-Уитни: $p\text{-value} = 1.722 \times 10^{-12}$). Средние величины различаются с уровнем достоверности более 99% по критериям распределения Стьюдента.

Этим мы показываем, что эволюцию магнитных полей СР-звёзд во время их пребывания на Главной последовательности следует изучать по Вр-звёздам. На это есть несколько причин.

1. Практически все Ар-звёзды нашей выборки являются звёздами поля, поэтому их возраст определяется по эволюционным трекам [28]. Из распределения на Рис. За хорошо видно, что большинство звёзд сконцентрированы в интервале $\log t$ от 8.2 до 8.9, т.е. возраст различается не более, чем в 5–6 раз. В то же время, эти различия для Вр-звёзд достигают двух порядков. Так как в среднем возрасте магнитных Ар-звёзд различаются мало, их использование не даст эффекта при попытках построения эволюционных зависимостей. Для этой цели необходимо исследовать и сравнивать объекты, возраст которых различается существенно.

2. В отличие от Ар-звёзд, возраст примерно половины Вр-звёзд найден по возрасту скоплений, членами которых они являются. Величина $\log t$ звёзд скоплений определяется значительно увереннее, чем объектов поля по эволюционным трекам, поэтому можно считать, что в целом возраст Вр-звёзд нашей выборки определен более надежно, чем Ар-звёзд.

3. Нельзя исключить, что примерно одинаковый хронологический возраст большей части Ар-звёзд поля из нашей выборки связан с ограничениями метода определения $\log t$ по эволюционным трекам, но обсуждение этого вопроса выходит за пределы предлагаемой нами работы.

Тем не менее, очевидно, что менее массивные Ар-звёзды эволюционируют на Главной последовательности существенно дольше, чем более массивные Вр-звёзды и, тем самым, их хронологический возраст в среднем несомненно больше, что Рис. 3 и демонстрирует. Поэтому сравнение магнитных полей Ар и Вр-звёзд может дать ценные сведения об эволюции магнитных полей при жизни звезды на ГП.

В работе Кочухова и Баныюло [28] рассчитывается еще и эволюционный возраст τ , соответствующий доле времени, которую звезда уже провела на Главной последовательности. Использование эволюционного возраста вместо хронологического требует еще более сложных вычислений, поэтому вопрос нуждается в дополнительном обсуждении. Кроме того, количество звёзд с вычисленными величинами τ в 2 раза меньше, чем найденными разными способами величинами $\log t$, что существенно обедняет и так небольшую статистику. Анализ магнитных полей в зависимости от величины τ будет выполнен в другой работе.

Сравним средние величины магнитных полей $\langle B_e \rangle$ всех Ар и Вр-звёзд из Таблицы 2, независимо от того, имеются ли сведения в литературе об их возрасте. Это мы делаем для того, чтобы использовать максимально возможную выборку звёзд с измеренными полями, принимая во внимание, что в среднем возраст Вр-звёзд меньше. Получаем:

$$\langle B_e \rangle = 1170 \text{ Гс для Ар-звёзд,}$$

$$\langle B_e \rangle = 1776 \text{ Гс для Вр-звёзд.}$$

Сравнение средних показывает, что в целом магнитное поле $\langle B_e \rangle$ Вр-звёзд больше примерно в 1.5 раза, но уровень достоверности полученных различий средних не очень высокий — порядка 80% (согласно критериям распределения Стьюдента). Видим, что и для этой выборки сохраняется тренд: поле уменьшается с уменьшением массы и ростом возраста звёзд.

3.3. Возраст звёзд с наиболее сильными полями

Логично предположить, что если указанный выше (см. Рис. 2) тренд реально существует, то звёзды с самыми сильными полями должны чаще встречаться среди хронологически молодых объектов. Для экспериментальной проверки этого утверждения из работ [8, 12] выделим СР-звёзды у которых по крайней мере один из параметров соответствует следующим критериям: 1) среднеквадратическое поле $\langle B_e \rangle > 2 \text{ кГс}$, 2) любой из экстремумов продольной компоненты $B_e(\text{extr}) > 3 \text{ кГс}$.

В Таблицу 3 включены также звёзды HD 35502 и HD 37776, которые формально не удовлетворяют выше перечисленным критериям. Но наблюдения и модельные расчеты показывают, что они обладают сильными полями сложной топологии, экстремальные значения поля значительно превышают 3 кГс.

Таблица 3. Звёзды с наиболее сильными полями

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	Sp	Печ	$\log t$
BD +40°175 A	2800 ± 150	-3400 / -2000	A2	SrCrEu	
BD +40°175 B	1500 ± 150	+800 / +2000	A	CrEu	
HD 6757A	2730 ± 160	+2300 / +2900	A0	CrEuSi	
HD 12288	1643 ± 150	-3100 / -200	A2	CrSi	8.54
HD 19712	2510 ± 250	-3800 / +1900	B9	CrEu	6.74
HD 27309	1755 ± 602	-4000 / -200	A0	SrSi	8.07
HD 27404	1700 ± 190	-3100 / +1100	A0	Si	
HD 32633	2760 ± 263	-5700 / +3500	B9	SiCr	6.39
HD 35298	2275 ± 444	-2810 / +2920	B6	He-wk	7.3
HD 35502	1490 ± 140	-2295 / -50	B6	He-wk	7.3
HD 36485	3220 ± 318	-3700 / -1900	B2	He-r	6.6
HD 36526	2130 ± 200	-980 / +3400	B8	He-wk, Si	6.6
HD 290665	1500 ± 200	-1600 / +7000	A0	CrEuSr	
HD 37479	1980 ± 155	-1600 / +3500	B2	He-r	6.6
HD 37642	2100 ± 180	-3000 / +3000	B9	He-wk	6.4
HD 37776	1260 ± 385	-2000 / +2000	B3	He-r	6.6
HD 45583	2880 ± 600	-2500 / +3800	B9	Si	7.30
HD 258686	6000 ± 320	+5100 / +7900	B8	Si	8.36
HD 47103	3326 ± 365	-4000 / -3000	A8	SrEu	
HD 49713	2560 ± 460	-2880 / +2200	B9	SiCrEu	
HD 55755	3100 ± 40	-3280	B9	Si	7.97
HD 56343	3000 ± 70	-3100	B9		7.08
HD 58260	2290 ± 300	+2000 / +2600	B2	He-wk	7.41
HD 62140	1336 ± 306	-2200 / +3200	F0	SrEu	8.90
HD 65339	3200 ± 400	-5400 / +4200	A2	SrCrEu	8.84
HD 66318	5000 ± 30	+5000 / +5200	A0	EuCrSr	8.85
HD 70331	2800 ± 184	-3000 / -2000	B8	Si	
HD 93507	2164 ± 278	+1600 / +2600	A0	SiCr	
HD 94660	2352 ± 265	-3300 / -1800	A0	EuCrSi	8.42
HD 96707	1070 ± 722	-3900 / +800	F0	Sr	8.87
HD 112381	3400 ± 245	-3700 / -3100	A0	SiCr	7.02
HD 115440	3100 ± 75	+3120	B9	Si	6.51
HD 119419	1770 ± 455	-4200 / +1800	A0	SiCrEu	7.73
HD 133029	2420 ± 319	+1300 / +3300	B9	SiCrSr	8.41

Таблица 3. (Продолжение)

Звезда	$\langle B_e \rangle \pm \sigma$, Гс	$B_e(\text{extr})$, Гс	Sp	Pec	$\log t$
HD 133880	2415 \pm 241	-4400 / +1920	B9	Si	8.15
HD 138218	240 \pm 1600	-3500 / +1300	F2	Sr	
HD 142301	2100 \pm 420	-4100 / +1600	B4	He-wk	7.27
HD 143473	4292 \pm 362	+4200 / +5100	B9	Si	6.44
HD 147010	4032 \pm 402	-4500 / -2500	B9	SiCrSr	6.47
HD 151965	2602 \pm 282	-3700 / -550	B9	Si	7.68
HD 153882	1750 \pm 562	-1800 / +3100	B9	SrCrEu	8.55
HD 154708	6000 \pm 50	+5764 / +7530	A2	SrCrEu	
HD 157751	4000 \pm 55	+3968 / +4063	B9	SiCr	
HD 318107	3000 \pm 50	+1000 / +5200	B8		7.97
HD 349321	2700 \pm 300	-4400 / +1900	B9	Si	
HD 175362	3570 \pm 448	-5000 / +7000	B3	He-wk	6.92
HD 178892	5410 \pm 470	+2100 / +7200	A0	SrCrEu	8.91
HD 343872	2930 \pm 320	-700 / +4500	B8	Si	
HD 184927	1465 \pm 430	-1200 / +3000	B2	He-r	6.85
HD 335238	1738 \pm 247	-3040 / +1260	A0	SrCrEu	
HD 209051	2620 \pm 640	-3300 / -1040	A0	SrCrEu	
HD 215441	17 500 \pm 500	+10 000 / +20 000	B5	Si	
HD 217833	3000 \pm 500	-6200 / -1500	B8	He-wk	8.82
HD 221936	2000 \pm 200	-2500 / +2900	B9	Si	8.45

Итак, удалось выделить 54 CP-звезды, магнитные поля которых соответствуют принятым критериям отбора. У 37 из них (68.5%) определен возраст. Гистограмма распределения возрастов $\log t$ для Ap и Bp-звезд с самыми сильными полями продемонстрирована на Рис. 4.

Видим, что 12 звёзд из 37 имеют $\log t > 8.0$, 14 — $\log t$ от 7.0 до 8.0 и 11 — менее 7.0. Среднее значение возраста:

$$\langle \log t \rangle = 7.58$$

Сравнивая со средним возрастом выборки Ap-звёзд ($\langle \log t \rangle = 8.57$) и Bp-звёзд ($\langle \log t \rangle = 7.65$) из Таблицы 2 видим, что действительно Ap/Bp-звёзды с наиболее сильными полями чаще находят среди молодых объектов.

32 звезды из 54-х (59.3%) принадлежит к спектральному классу B, что значительно выше общей

доли B-звёзд (35.2%) в списке Романиюка и Кудрявцева [8] и является дополнительным доказательством хронологической молодости объектов с сильными полями.

Несмотря на то, что (как видно из Рис. 4) примерно 1/3 часть объектов имеет $\log t > 8.0$, в целом распределение явно смещено в сторону молодых звёзд по сравнению с гистограммами, приведёнными на Рис. 3.

Таким образом, наше предположение о том, что звёзды с самыми сильными полями должны быть преимущественно молодыми, получает достаточно веское наблюдательное подтверждение.

Посмотрим распределение объектов по типам пекулярности. В таблице 3 имеется: SrCrEu — 13 звёзд, Si+ — 11 звёзд, Si — 13 звёзд, He-wk — 7 звёзд, He-r — 5 звёзд. Видим, что большинство из них составляют звёзды с усиленными линиями

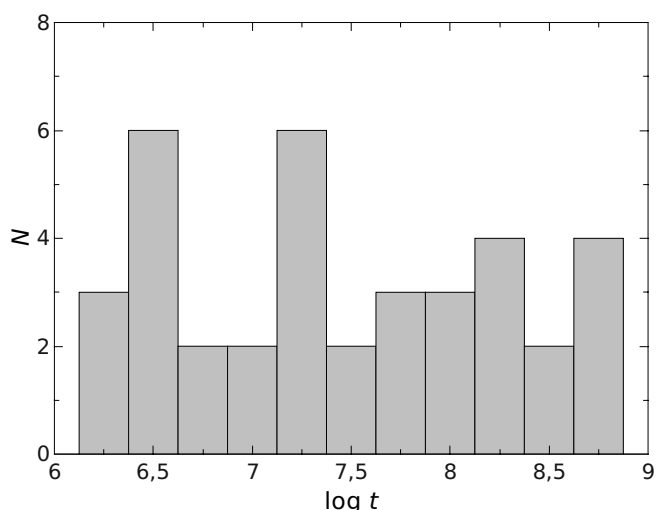


Рис. 4. Распределение возрастов $\log t$ CP-звёзд с сильными полями.

кремния (Si и Si+) = 44.4%, доля звёзд с аномальными линиями гелия (He-wk и He-g) ровно в два раза меньше (22.2%).

Отметим, что относительная доля звёзд He-g и Si+ среди объектов с самыми сильными полями в 2 раза выше доли звёзд типа Si и He-wk по сравнению с распределением по типам пекулярности в общем списке магнитных В-звёзд в Таблице 1.

3.4. Магнитные поля объектов с возрастом $\log t > 7.5$ и $\log t < 7.5$

Для полноты картины построим еще две выборки: магнитных Ap/Bp-звёзд с абсолютным возрастом $\log t$ больше и меньше 7.5. В отличие от предыдущего раздела, где мы зафиксировали поле в определенных границах и сравнили возраст звёзд, здесь мы зафиксируем возраст и сравним поля.

Построенные таким образом выборки не являются полностью независимыми от приведенных выше, тем не менее существенно отличаются по набору объектов.

Выберем из Таблицы 2 звёзды, принадлежащие молодым скоплениям и, в частности, в Орионе и Скорпионе, а также звёзды поля с возрастом $\log t < 7.5$, и найдем распределение магнитных полей у них. Мы нашли 17 таких объектов. Среднее значение $\langle B_e \rangle$ молодых звёзд:

$$\langle B_e \rangle = 2010.$$

Найдем среднее значение $\langle B_e \rangle$ 84 звёзд, имеющих $\log t > 7.50$:

$$\langle B_e \rangle = 1176.$$

Таким образом, мы видим, что среднее значение среднеквадратического продольного поля $\langle B_e \rangle$ для 17 молодых звёзд с возрастом $\log t < 7.5$ примерно в два раза больше, чем для 84 звёзд с $\log t > 7.5$. Уровень достоверности этих различий 99%.

4. ЗАДАЧИ БЛИЖАЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Введение

В предыдущих разделах мы провели анализ современного состояния проблемы, связанной с изучением эволюции магнитных полей звёзд на ГП. Мы не претендуем на полноту этого анализа, наша главная цель — очертить круг проблем, решением которых целесообразнее всего заняться в ближайшее время.

Используя различные критерии мы построили разнообразные выборки магнитных звёзд, которые послужили базой, на основании которой выполнен анализ магнитных полей у объектов разного возраста. Сравнение выборок показывает, что во всех случаях с той или иной степенью достоверности в среднем магнитное поле у молодых массивных звёзд больше, чем у более старых объектов.

Общий тренд очень маскируется большим разбросом данных по индивидуальным объектам. Дисперсия вызвана физическими причинами, а не ошибками методики. Этот вывод не нов, важно то, что несмотря на трёхкратное увеличение количества звёзд с измеренными магнитными полями и найденными возрастами, общий ход зависимости не изменился — поле у горячих звёзд больше.

Однако, основываясь только на полученных выше данных, мы не можем отдать предпочтение реликтовой теории. Так как молодые и горячие звёзды вращаются в целом быстрее, их большее поле можно истолковать также и в пользу теории динамо.

4.2. Цели новых наблюдений

Мы считаем, что при помощи статистических исследований большой выборки объектов удастся провести объективные тесты, указывающие на конкретные механизмы образования магнитного поля CP-звёзд и его эволюции на ГП.

Если удастся надежно подтвердить уменьшение магнитного поля с возрастом, значит звезда имеет реликтовое поле. Если будет найдено уменьшение поля с увеличением периода вращения — значит работает механизм динамо. Если не будет найдено никаких зависимостей — это может означать, что либо наши теоретические предсказания еще далеки

от совершенства, либо измеряемое нами в атмосфере поле может быть не совсем адекватной характеристикой общего магнитного момента звезды.

Поиски и изучение указанных закономерностей, на наш взгляд, целесообразно проводить по звёздам разной массы. Массивные Вр-звёзды, периоды вращения которых различаются сравнительно мало, но их возраста заключены в интервале от нескольких миллионов до нескольких сотен миллионов лет, лучше всего использовать при поисках эволюционных зависимостей. Напротив, хронологические возраста менее массивных Ар-звёзд различаются мало, но периоды вращения находятся в широком диапазоне — от нескольких суток до десятков лет. Поэтому по Ар-звёздам целесообразно искать зависимости поля от скорости углового вращения.

Цель нашей работы — изучение эффектов эволюции магнитных полей СР-звёзд на Главной последовательности путем комплексного изучения магнитных Вр-звёзд разного возраста.

Как мы показали выше в Таблице 1, в настоящее время известно всего 125 магнитных Вр-звёзд. Поэтому для достижения нашей цели, в первую очередь, необходимо увеличить количество этих объектов с измеренными магнитными полями и найти их возраст. Последний можно определить по эволюционным трекам, но гораздо надежнее искать и изучать магнитные Вр-звёзды среди членов рассеянных скоплений и ассоциаций разного возраста.

Точность измерений магнитных полей Вр-звёзд заметно ниже, чем Ар-звёзд. Это связано с малым количеством линий, наблюдаемых в их спектрах. Кроме того, они часто бывают уширены вращением и имеют сложные профили. У значительной части Вр-звёзд (особенно с аномальными линиями гелия) магнитные поля были открыты на водородном магнитометре Ландстрита (например, [14, 15]), а по земановским спектрам поле не изучалось. Различие методик может дать различные результаты.

Как правило, принимается дипольная структура магнитных полей СР-звёзд. Глаголевский и Герт [34] считают, что ориентации диполей по отношению к оси вращения случайны, как для быстрых, так и для медленных ротаторов.

Важно отметить, что случаи, когда кривая переменности продольной компоненты магнитного поля имеет несинусоидальную форму, известны только для хронологически молодых звёзд. В работе Романиюка [35] продемонстрированы 6 звёзд (HD 32633, HD 35502, HD 37776, HD 45583, HD 133880 и HD 175362), кривая переменности продольного поля B_e у которых несинусоидальна, на ней имеются локальные максимумы и минимумы. Это свидетельствует о существовании сильного поля сложной структуры. Примечательно,

что все указанные 6 звёзд молоды, их возраст не превышает 20 млн лет. Указанное обстоятельство поддерживает реликтовую теорию: в ней мелкие сложные структуры возможны в начале эволюции звезды на ГП, далее они относительно быстро распадаются, структура упрощается и к концу эволюции звезды на ГП остается только диполь.

Моделирование магнитных полей недипольной топологии представляется трудной задачей, сложные профили поляризованных линий можно исследовать только самыми совершенными методами (как это было сделано для звезды с усиленными гелия HD 37776 в работе Кочухова и др. [36]).

Необходимо также проверить, является ли поле порядка 50 кГс максимально возможным для магнитных СР-звёзд [35]. Кроме того, можно ожидать, что в сильных полях различные зависимости физических параметров звезды от поля (если они существуют) должны проявиться наиболее сильно, а относительная точность измерений сильных полей выше, что позволяет исследовать более тонкие эффекты при изучении поляризованных профилей спектральных линий.

Нами уже была выполнена работа по поиску сильных магнитных полей у звёзд спектрального класса В9–А7 с большими депрессиями в континууме [21]. Ее результатом было обнаружение и исследование объектов с сильными полями. В указанной работе, используя обнаруженную в Женевской обсерватории корреляцию между величиной магнитного поля на поверхности звезды и степенью аномальности ее континуума, были проведены наблюдения около 150 звёзд с сильными аномалиями спектра на 5200 Å и обнаружено около 120 новых магнитных звёзд [33].

Хотя наблюдения показали, что имеют место существенные расхождения в величине магнитных полей, полученных по эффекту Зеемана и предсказанных по фотометрии, тем не менее, объекты с самыми большими аномалиями оказались магнитными звёздами с сильными полями [22]. Наиболее горячие из указанных объектов имеют эффективную температуру около 13 000 К и, таким образом, затрагивают лишь самые поздние подклассы В-звёзд (В8–В9).

У более горячих звёзд аномалии не наблюдаются, следовательно, необходимо искать другие критерии отбора кандидатов для наблюдений. Мы прилагаем усилия для их поиска, но к настоящему времени найдены только косвенные индикаторы наличия магнитного поля у Вр-звёзд с $T_e > 13\,000$ К: это аномально сильные линии гелия и, в меньшей степени, — кремния.

4.3. Основные параметры магнитных В-звёзд

При составлении программы наблюдений на 6-м телескопе мы использовали список объектов, представленный в Таблице 1 настоящей статьи. В ней указаны магнитные поля, температуры, спектральный класс и тип пекулярности всех найденных к настоящему времени Вр-звёзд. Но для дальнейших исследований необходимо иметь данные и о других параметрах наших объектов.

В Таблице 4 приведены сведения о пространственном распределении, кинематике и вращении всех звёзд из Таблицы 1. Основным источником сведений — наша база данных, описанная в работе [19]. При выполнении работы по составлению указанной таблицы широко использовались также параметры из баз данных SIMBAD (www.simbad.u-strasbg.fr/simbad) и VIZIER (<http://vizier.u-strasbg.fr/>)

Мы проанализировали все имеющиеся у нас сведения, сопоставили данные, полученные разными авторами, и представили в Таблице 4 наиболее надежные, на наш взгляд, параметры магнитных В-звёзд, которые могут быть использованы как в нашей дальнейшей работе, так и другими авторами.

В Таблице 4: l и b — галактические координаты; d — расстояние до объекта в парсеках, вычислены согласно пересмотренным данным каталога HIPPARCOS [37]; лучевые скорости V_r в км/сек — из VIZIER; проекции скоростей вращения на луч зрения $v \sin i$ в км/сек — из базы данных [19], значительная часть из них приведена в работе [38]; периоды вращения P в сутках — взяты в основном из каталога Каталано и Ренсона [39] и Приложений к нему. Возраст $\log t$ определялся либо по возрасту скопления для входящих в него звёзд, либо взят из работы Кочухова и Баньюло [28]. Указана также принадлежность к скоплению.

В целом имеется согласие возрастов, определенных обоими методами по общим звёздам. В случае разногласий в Таблице 4 помещен возраст скопления, как более надежный [9]. $\log t$ для скоплений в основном взят из базы данных WEBDA (www.univie.ac.at/webda).

53 звезды из общего списка (42.4%) входят в рассеянные скопления, что позволяет надежно определить их возраст. По эволюционным трекам Кочухов и Баньюло [28] вычислили $\log t$ еще 45 Вр-звёзд. Таким образом, оценки возраста имеются примерно для 80% объектов Таблицы 4.

Далее мы проведем краткий оценочный анализ пространственного распределения и вращения двух основных групп магнитных Вр-звёзд: объектов с аномальными линиями гелия и кремния. Он нам необходим для составления программы будущих наблюдений.

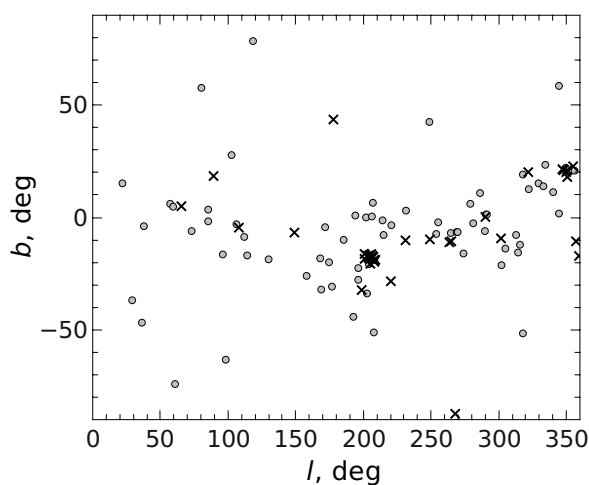


Рис. 5. Пространственное распределение звёзд с аномальными линиями гелия и кремния.

В данной работе мы не будем анализировать лучевые скорости Вр-звёзд, но отметим, что кинематика магнитных В-звёзд практически не отличается от нормальной. За исключением одной звезды (HD 69067) с большой лучевой скоростью, остальные движутся синхронно с нормальными В-звёздами.

4.4. Пространственное распределение и вращение звёзд с аномалиями кремния и гелия

4.4.1. Членство в скоплениях и пространственное распределение

Анализируя Таблицу 4 видим, что в рассеянные скопления входит только 20% Вр-звёзд с аномальными линиями кремния и 67% Вр-звёзд с аномалиями гелия. Избегание кремниевыми звёздами скоплений и принадлежность большей части гелиевых звёзд к ним нуждается в объяснении.

Вероятно, это следствие различий в физических условиях, имевших место при формировании Вр-звёзд в разных скоплениях. Следует принимать во внимание и возможные эффекты наблюдательной селекции. Звёзды с аномальными линиями гелия имеют большую светимость, чем кремниевые. Следовательно, их легче выявить и наблюдать с анализаторами поляризации в далеких скоплениях. Но большинство скоплений, в которых находятся Вр-звёзды с измеренными магнитными полями находятся относительно близко, поэтому мы считаем, что этот эффект не играет определяющей роли.

На реальность указанных различий указывает следующее: из 18 магнитных Вр-звёзд, входящих в различные молодые скопления и ассоциации в Орионе, все — с аномальными линиями гелия. С другой стороны, в различных группировках в

Скорпионе-Центавре находятся 9 звёзд с аномальными линиями гелия и 8 — с аномальными линиями кремния. Вопрос ждёт своего исследования.

Пространственное распределение звёзд с аномальными линиями гелия и кремния продемонстрировано на Рис. 5.

Видим, что звёзды с усиленными линиями крем-

ния распределены достаточно равномерно по галактической долготе l и имеют достаточно резкую концентрацию к плоскости Галактики. Средний возраст по 27 из них, для которых он определен:

$$\langle \log t \rangle = 7.77.$$

Таблица 4. Пространственное распределение и основные параметры магнитных В-звёзд

Звезда	l	b	d , пк	V_r , км/с	$v \sin i$, км/с	P , дни	$\log t$	Скопление
HD 315	98.0	-63.3	183	+13.2	81			
HD 5737	268.0	-87.3	238	+10.3	10	21.65	7.97	
HD 8855	129.9	-18.5	543	-10.0	25			
HD 16582	170.8	-52.2	199	+12.7	11			
HD 19832	157.7	-26.0	154	+11.0	110	0.73	7.95	
HD 21590	168.7	-31.7	165	+02.4	40			
HD 21699	148.7	-06.7	185	+00.5	59	2.47	7.85	Mellotte 20
HD 22470	207.5	-50.9	149	+14.0	75	1.93	8.10	
HD 22920	192.1	-44.2	152	+15.7	50	3.96	8.01	
HD 24155	176.1	-30.7	123	+16.3	40	2.53	7.30	
HD 25823	167.4	-18.0	128	-02.0	15	7.22	8.13	
HD 27309	174.0	-19.8	100	+12.4	45	1.57	8.07	
HD 28843	198.6	-32.1	145	+18.4	100	1.38	7.65	
HD 29009	202.5	-33.5	254	+01.7	60	3.79		
HD 29925	195.9	-27.7	342	+21.1	23			
HD 32145	196.1	-22.4	255	+03.0	60	2.42		
HD 32633	171.1	-04.2	180	-19.8	23	6.43	6.39	
HD 34452	172.9	-02.1	126	+28.6	45	2.47	7.82	
HD 34797	220.3	-28.4	245	+15.0	42	2.28	8.16	
HD 34719	184.8	-09.9	185	+16.9	49	1.64	7.50	Pleiades group
HD 35008	203.7	-20.6	183	+11.1			7.30	Ori OB1a
HD 35298	200.6	-18.4	530	+25.0	57	1.85	7.30	Ori OB1a
HD 35456	205.0	-20.4	580	+21.8	22	1.70	7.30	Ori OB1a
HD 35502	205.3	-20.5	425	+17.6	58	1.70	7.30	Ori OB1a
HD 36313	203.8	-18.1	470	+31.3		0.59	6.60	Ori OB1b
HD 36429	201.0	-16.3	195	+21.9	75		7.30	Ori OB1a

Таблица 4. (Продолжение)

Звезда	l	b	d , пк	V_r , км/с	$v \sin i$, км/с	P , дни	$\log t$	Скопление
HD 36485	203.8	-17.7	900	+21.0	32	1.71	6.60	Ori OB1b
HD 36526	205.1	-18.3	500		58	1.54	6.60	Ori OB1b
HD 36540	207.8	-19.7	450		83	2.17	6.40	Ori OB1c
HD 36629	208.0	-19.5	800	+21.2	5	5.01	6.40	Ori OB1c
HD 36668	203.2	-17.0	250	+30.1	49	2.12	6.40	Ori OB1c
HD 36916	207.8	-18.9	267	+10.7	40	1.56	6.40	Ori OB1c
HD 37017	208.2	-19.0	380	+29.0	150	0.90	6.40	Ori OB1c
HD 37058	208.5	-19.0	280	+22.8	0	14.61	7.30	Ori OB1a
HD 37140	204.4	-16.8	480	+14.7	37	2.71	6.40	Ori OB1c
HD 37479	206.8	-17.3	630	+29.0	150	1.19	6.60	Ori OB1b
HD 37642	207.6	-17.4	750	+05.5	100	1.08	6.40	Ori OB1c
HD 37776	206.1	-16.3	330	+27.0	80	1.54	6.40	Ori OB1c
HD 43819	193.9	+00.9	260	+09.0	20	1.08		
HD 45583	214.7	-07.4	295	+22.8	75	1.18	7.30	NGC 2232
HD 258686	201.6	+00.1	550	+28.0			8.36	Collinder 95
NGC 2244-334	206.5	-01.9	1500				6.90	NGC 2244
HD 47756	206.0	+00.5	285	+20.8	28			
HD 49333	231.4	-10.3	242	+19.0	65	2.18	7.27	
HD 49606	198.3	+07.0	263	+12.6	30	3.35		
HD 49713	213.9	-01.0	200	-04.1		2.13		
HD 50461	220.0	-03.2	300	+30.8				
HD 53081	206.7	+06.7	750					
HD 55522	238.4	-07.3	260	+21.6	100	2.73	7.67	
HD 56343	244.1	-09.3	600			3.25	7.08	Collinder 132
HD 58260	248.9	-09.8	410	+36.0	10	1.65	7.41	Collinder 135
HD 61045	231.1	+03.1	400	+39.0	56		6.90	NGC 2422
HD 63401	253.7	-07.1	200	+16.3	50	2.40	7.65	NGC 2451
NGC 2489-40	246.7	-00.8	2000				7.26	NGC 2489
HD 64740	263.4	-11.1	232	+08.0	160	1.33	7.10	
HD 65987	273.7	-15.8	560	+23.0	13	1.45	8.05	NGC 2516
HD 66295	273.9	-15.7	410	+06.6	13	2.45	8.05	NGC 2516
HD 66522	265.0	-10.5	440	+15.0	30	< 20	7.23	
HD 69067	255.1	-01.8	900	+185.0			7.87	NGC 2546

Таблица 4. (Продолжение)

Звезда	l	b	d , пк	V_r , км/с	$v \sin i$, км/с	P , дни	$\log t$	Скопление
HD 70331	264.3	-06.7	750			3.03		
HD 73340	268.3	-06.2	137	+23.1		2.66	7.79	
HD 74168	269.5	-06.2	308	+37.0	55	1.75		
HD 78316	219.0	+35.1	163	+24.2	15	5.00		
HD 79158	177.9	+43.6	178	+20.9	29	3.83	8.16	
HD 86199	280.9	-02.6	232	+07.1	30	5.50	8.10	
HD 89103	278.5	+06.1	189	+02.0	30		6.68	
HD 90044	248.3	+42.6	104	+23.0	15	4.38	8.49	
HD 92385	289.5	-05.7	148		170	0.55	7.51	IC 2602
HD 92664	289.7	-05.7	160	+29.7	50	1.67	7.84	
HD 96446	290.1	+00.3	472	+06.5	16	23.0	6.46	
HD 96729	289.8	+01.5	700			1.39	8.50	NGC 3532
HD 96910	285.9	+11.1	520	+01.8	40	13.5		
HD 98340	291.2	+01.5	222	+03.6	110		8.24	
HD 105382	295.9	+11.6	134	+16.5	70		7.69	Sco-Cen ass
HD 105770	301.8	-21.0	191	-13.1	30	3.72	7.94	
HD 109026	301.5	-09.3	100	+02.5	180	2.73	7.91	
HD 112413	118.3	+78.8	35	-03.3	24	5.47	8.27	
HD 115440	304.7	-13.6	199					
HD 122532	317.2	+19.5	220	+04.0		3.68	8.27	
HD 124224	344.4	+58.6	79	-02.0	120	0.52	7.97	
HD 125823	321.6	+20.0	140	+07.9	18	8.82	7.51	Sco-Cen ass
HD 127575	312.8	-07.8	143	+07.0	30	3.73	6.55	
HD 128775	322.0	+13.0	208	+03.0	30	1.63	8.04	Sco OB2
HD 133029	080.2	+57.7	170	-11.2	20	2.88	8.41	
HD 133652	334.3	+23.6	121	+02.0	31	2.30	6.39	Sco-Cen ass
HD 133880	329.2	+15.2	110	+02.8		0.88	8.15	Sco-Cen ass
HD 137193	332.5	+13.9	280	-18.0	30	4.90	7.00	Sco-Cen ass
HD 137509	315.3	-12.1	195			4.49	7.89	
HD 138758	313.7	-15.2	208	+02.2	50	8.26		
HD 138769	331.0	+08.8	130	+07.9	80	7.32		
HD 142301	347.1	+21.5	158	-08.7	47	1.46	7.27	Sco-Cen ass
HD 142884	349.0	+22.3	150	-12.0	130		7.00	Sco-Cen

Таблица 4. (Продолжение)

Звезда	l	b	d , пк	V_r , км/с	$v \sin i$, км/с	P , дни	$\log t$	Скопление
HD 142990	348.1	+21.2	170	-11.1	140	0.98	7.54	Sco-Cen ass
HD 143474	339.6	+11.4	116	+00.3			6.44	Sco-Cen ass
HD 144334	350.3	+20.9	161	-06.6	25	1.49	7.72	Sco-Cen ass
HD 144661	350.0	+20.0	119	-04.6	39		7.00	Sco-Cen ass
HD 145501	354.6	+22.7	145	+02.4	70		7.72	Sco ass
HD 146001	350.4	+18.1	149	-08.0	100		7.00	Sco-Cen ass
HD 147010	355.5	+20.9	163	-09.0	23	3.92	6.47	Sco ass
HD 149277	338.4	+01.2	1000	+01.4			7.25	NGC 6178
CD -48° 11051	336.5	-01.6	1159	-32.0	100		6.77	NGC 6193
HD 151965	344.1	+02.1	195	-02.9		1.60	7.68	
HD 159545	021.4	+15.4	330	+06.9				
HD 168733	357.0	-10.6	170	-11.8		6.35	8.12	
HD 170000	101.9	+28.0	93	-16.0	80	1.71	8.32	
HD 170836	013.6	-04.6	480				7.96	IC4725
HD 175362	359.2	-17.0	132	+01.3	28	3.67	6.92	
HD 343872	057.0	+06.5	800				8.79	
HD 179761	037.5	-03.9	218	-05.4		1.73		
HD 338226	058.7	+05.0	600					
HD 183339	089.4	+18.5	360	-22.0	40		8.05	
HD 184927	065.5	+05.2	540	-16.0	14	9.53	6.85	
HD 196178	084,6	+03.9	132	-21.7	55	1.01	7.99	
HD 196606	072.9	-05.7	262	-19.0	60			
HD 199728	028.5	-36.5	164	-11.2		2.24		
HD 200311	085.3	-01.7	235	-14.5	0	52.00		
HD 207188	036.1	-46.6	212	-13.9	43			
HD 213918	095.9	-16.2	700				6.98	ASCC 122
HD 215441	105.6	-02.9	500		< 5	9.49		
HD 217833	107.8	-04.4	260	-12.6	38	5.39	7.82	
HD 221006	317.8	-51.6	118	+15.3		2.31	7.32	
HD 221936	111.5	-08.6	550		< 60	0.63	8.45	Stock 12
HD 223640	060.5	-73.9	98	+12.7	30	3.73	8.11	
HD 224801	113.6	-16.7	188	-00.7	40	3.74	8.27	

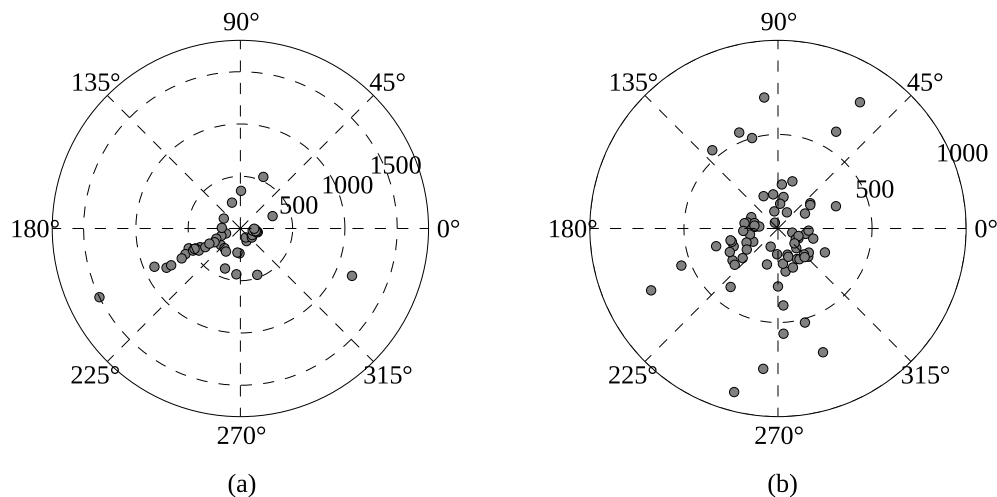


Рис. 6. Распределение в координатах “галактическая долгота — расстояние от Солнца”.

Звёзды с аномальными линиями гелия показывают четкую концентрацию в молодых скоплениях в Орионе и Скорпионе-Центавре. Для 29 звёзд из 42-х был определен возраст. Его среднее значение

$$(\log t) = 7.14.$$

Видим, что в среднем возраст звёзд с аномальными линиями гелия (14 млн лет) в 4-5 раз меньше, чем у кремниевых звёзд (59 млн лет). Причина понятна — гелиевые звёзды более массивны, чем кремниевые, и эволюционируют быстрее. Поэтому на Главной последовательности видим хронологические более молодые звёзды.

Поскольку для большинства объектов определены параллаксы, можем рассмотреть распределение в координатах “галактическая долгота — расстояние от Солнца” (на Рис. 6). Здесь видны те же особенности в пространственном распределении, что и на Рис. 5.

Среднее расстояние до кремниевых звёзд — 273 пк. Ближе 300 пк находится 51 звезда из 70 (72.8%), далее 500 пк — 10 звёзд (14.2%).

Среднее расстояние до гелиевых звёзд — 352 пк. Ближе 300 пк находится 22 звезды из 40, что составляет 55%, далее 500 пк — 10 звёзд (25.0%).

Учтем, что среди звёзд с аномальными линиями гелия большую долю составляют члены различных скоплений в Орионе, находящихся на расстояниях около 500 пк.

В целом получается, что на расстоянии до 300 пк находятся примерно 3/4 звёзд с усиленными линиями кремния и около половины — с аномальными

линиями гелия. Для объектов, удаленных более чем на 300 пк, точность определения параллаксов становится очень низкой, поэтому найденные расстояния уже не следует использовать для количественных оценок.

4.4.2. Вращение магнитных В-звёзд

Рассмотрим осевое вращение магнитных Вр-звёзд, которое характеризуется проекциями скоростей вращения $v \sin i$ на луч зрения и периодами вращения. Методики определения указанных величин совершенно независимы друг от друга, поэтому их предпочтительнее анализировать отдельно.

Как правило, период вращения звезды определяется из длительных рядов наблюдений. Проекция скорости вращения $v \sin i$ может быть найдена даже по одному спектру по ширине линий. Точность определения зависит от спектрального разрешения, правильности учета влияния магнитного уширения линий и некоторых других параметров. Тем не менее, грубые ошибки в определении $v \sin i$ практически исключены.

В Таблице 4 для 73 звёзд из 125 приведены сведения одновременно и о проекциях скоростей вращения на луч зрения, и о периодах вращения. Проанализируем их отдельно.

а. Скорости вращения. Распределение проекции скоростей вращения ($v \sin i$) кремниевых и гелиевых звёзд продемонстрировано на Рис. 7.

Видим, что группировка кремниевых звёзд более однородна по этому параметру: большинство из них имеет величину $v \sin i$ в пределах от 10 до 60 км/с.

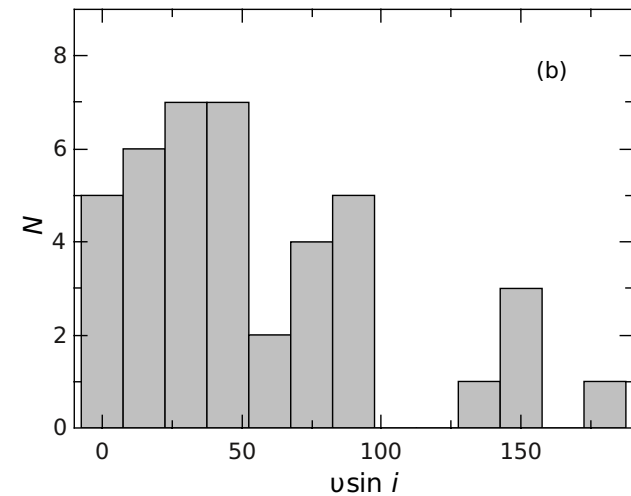
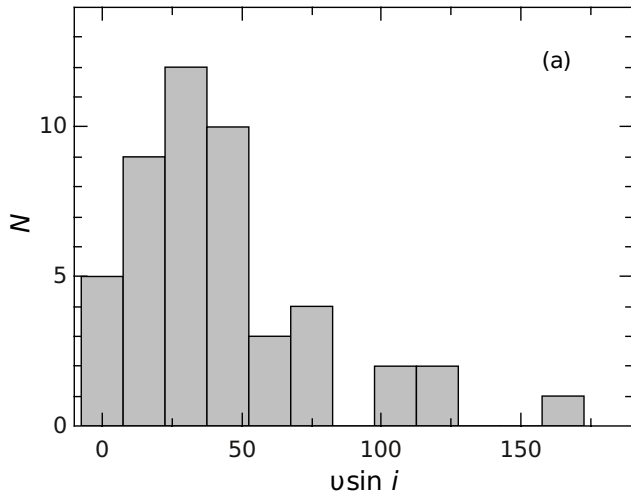


Рис. 7. Распределения величины $v \sin i$ для звёзд с аномальными линиями гелия и кремния.

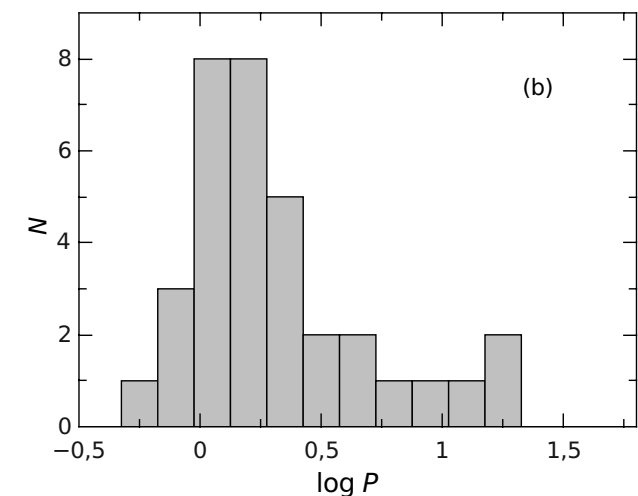
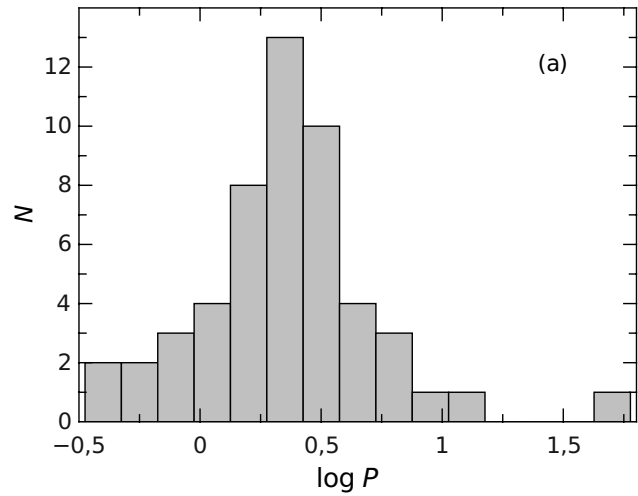


Рис. 8. Распределение периодов вращения гелиевых и кремниевых звёзд.

Средняя величина проекции скорости вращения по 51 звезде с аномальными линиями кремния:

$$\langle v \sin i, (\text{Si}) \rangle = 46.9 \text{ км/с.}$$

Для гелиевых звёзд наблюдается большая дисперсия значений $v \sin i$: нет тренда в количестве звёзд в интервале проекций скоростей вращения в интервале от 0 до 120 км/с. Кроме того, имеется группа объектов с очень быстрым вращением. Средняя величина $v \sin i$ по 41 звезде с аномальными линиями гелия:

$$\langle v \sin i, (\text{He}) \rangle = 62.1 \text{ км/с.}$$

Средние значения $v \sin i$ различаются со статистической достоверностью около 90% (по критериям распределения Стьюдента). Тест Колмогорова-Смирнова дает величину $p\text{-value} = 0.1639$, тест

Мунна-Уитни — $p\text{-value} = 0.1741$. Обобщая полученные выше результаты статистического анализа, приходим к выводу, что имеются указания на то, что проекции скоростей вращения $v \sin i$ звёзд с аномальными линиями гелия примерно в 1.3 раза больше, чем для кремниевых звёзд. Но надёжность этого вывода недостаточно высокая — на уровне 80%–90%.

б. Периоды вращения. Сравним периоды вращения звёзд. При статистическом анализе удобнее использовать величину логарифма периода ($\log P$), где период P выражен в днях.

На Рис. 8 приведено распределение $\log P$ звёзд с аномальными линиями кремния и гелия. Для 52 кремниевых звёзд с известными периодами:

$$\langle \log P, (\text{Si}) \rangle = 0.421.$$

Для 34 гелиевых звёзд с известными периодами:

$$\langle \log P, (\text{He}) \rangle = 0.400$$

Из Рис. 8а видим, что большинство звёзд с аномальными линиями гелия имеют $\log P$ в интервале от 0.05 до 0.45 (т.е. периоды P от 1 до 3-х суток с максимумом распределения P около 1.5 суток), а из Рис. 8б — что большинство звёзд с усиленными линиями кремния имеют $\log P$ от 0.15 до 0.60 (т.е. периоды P от 1.5 до 4-х суток с максимумом распределения P около 2.5 суток).

Статистический анализ показывает, что среднее значение и распределение периодов вращения гелиевых и кремниевых звёзд различаются с низкой достоверностью — порядка 70%. Видим, что кремниевые звёзды по величине периода распределены более компактно, и только у трех звёзд он превышает 20 суток; максимальный период (52 суток) найден для звезды типа Si+ — HD 200311. А периоды вращения гелиевых звёзд концентрируются в двух группах — основной, около 1.5 суток, и имеется “хвост” распределения P до 2 недель.

Считаем, что для надежного сравнительного анализа скоростей углового вращения звёзд с аномальными линиями кремния и гелия следует использовать большую выборку звёзд.

4.5. Программа будущих работ

Мы предлагаем провести полный спектральный и магнитный обзор массивных Вр-звёзд северного полушария в молодых скоплениях (возрастом менее 30 млн лет), находящихся на расстоянии ближе 1 кпк. В настоящее время пределом для 6-м телескопа является 11-я звёздная величина V .

Наш анализ, проведенный выше, показывает, что именно среди самых молодых Вр-звёзд следует искать объекты со сверхсильными для звёзд ГП магнитными полями, что является одной из главных целей нашей программы. Критерием отбора кандидатов для наблюдений поля будет служить наличие очень сильных линий гелия в спектре.

Вторая цель работы — более детальное исследование уже ранее известных массивных магнитных звёзд. Из-за быстрого вращения и, как следствие, большой ширины спектральных линий, их магнитные поля были обнаружены и исследованы в основном фотоэлектрическим способом на магнитометрах. Измерения поля, как правило, выполнялись по линиям водорода. Так как этот элемент равномерно распределен по поверхности звезды, магнитные поля, полученные указанным выше методом, очень хорошо отражают глобальную дипольную структуру поля. Но метод малочувствителен при необходимости изучать локальные магнитные поля сложной структуры.

К настоящему моменту мы знаем уже 6 объектов с явно недипольной структурой поля. И все они — горячие молодые звёзды [35]. Реально это значит, что поля у них значительно сильнее, чем это видно на кривой переменности продольной компоненты B_e , и имеют сложную мультипольную структуру. Анализ полей сложной топологии представляет собой трудную задачу, но она выполнима (например, [36]).

Мы ожидаем, что у значительной части звёзд с аномальными линиями гелия, магнитное поле которых исследовалось ранее по водороду, профили спектральных линий будут сложными. Мы надеемся, что моделирование таких сложных поляризованных профилей позволит найти сильные мультипольные поля у этих объектов.

Необходим также тщательный анализ методических вопросов. Как правило, не возникает проблем в случае звёзд с узкими и резкими линиями. Для таких объектов практически все методы дают одинаковые результаты. Но при исследованиях быстровращающихся пятнистых звёзд со сложными профилями линий поля, полученные разным способом, различаются порой очень существенно.

Еще одна цель работы — это определение частоты встречаемости магнитных Вр-звёзд относительно нормальных. Список из 125 магнитных Вр-звёзд, из которых примерно половина являются членами скоплений, еще очень небольшой для выполнения такого анализа. Поэтому надо находить новые магнитные Вр-звёзды, особенно в скоплениях.

В базе данных WEBDA приведен список рассеянных скоплений в которых найдены Ар/Вр-звёзды методами среднеполосной фотометрии. Вызывает удивление малое количество найденных в них пекулярных звёзд. Как правило, это 1–3 объекта, в лучшем случае — несколько. Вопросу о встречаемости магнитных Вр-звёзд в скоплениях необходимо уделить специальное внимание.

Несколько лет назад стартовал крупный международный проект комплексного исследования массивных ОВ-звёзд MiMeS [40], в том числе проводится поиск их магнитных полей. Получены первые результаты, из которых следует, что у О-звёзд не наблюдается сильных (более нескольких сотен Гс) продольных полей.

Мы не анализировали здесь такой важный параметр, как двойственность магнитных звёзд. Между тем, многие Вр-звёзды (особенно объекты с аномальными линиями гелия) являются членами двойных и кратных систем. Обзор современного состояния этой проблемы представлен в работе [41].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы рассмотрели современное состояние проблемы магнетизма массивных звёзд Главной последовательности. Мы продемонстрировали, что В-звёзды с аномальным химическим составом обладают наиболее сильными полями среди объектов ГП. Наш анализ показывает, что пекулярные В-звёзды с аномальными линиями кремния и гелия в спектрах являются наиболее перспективными объектами для наблюдательной проверки различных механизмов образования и дальнейшей эволюции магнитных полей CP-звёзд.

Мы планируем проводить дальнейшую работу в двух направлениях: 1) искать новые магнитные звёзды с сильными полями; 2) детально изучать уже известные магнитные звёзды с целью поиска сложной структуры поля у них.

На отсутствие генерации поля во время жизни звезды на Главной последовательности может указывать не только ослабление поля, но также и упрощение его структуры.

Магнитное поле звезды — это не поле однородно намагниченной сферы. Функция распределения магнитного поля по радиусу звезды — величина ненаблюдаемая. Видимое нами на поверхности поле может не полностью отражать реальный магнитный поток звезды. Не исключено, что с этим связана плохая корреляция между его величиной и другими физическими параметрами звезды.

Поэтому мы считаем, что надо сравнивать не только величины магнитных полей, но и их топологию. Вклад мультипольных компонент можно оценить количественно. Если сложная поверхностная структура поля будет найдена, то для количественной оценки степени неоднородности не потребуется делать каких-либо допущений о распределении поля внутри звезды. Достаточно построить карты распределения магнитного поля по поверхности, такие как, например, в статье Кочухова и др. [36]. Но для выполнения такой работы необходимо будет получить серии зеemanовских спектров с высоким разрешением для каждой изучаемой звезды.

То обстоятельство, что хоть какие-то неуверенные зависимости и тренды между величиной магнитного поля и другими параметрами, характеризующими звезду в целом, все же существуют, вселяет в нас надежду, что наблюдаемое нами поле каким-то образом отражает реальный магнитный поток от всей звезды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Д. О. Кудрявцева, Е. А. Семенко и Г. А. Чунтонова за обсуждение различных аспектов работы. Наше исследование частично поддержано грантами РФФИ 09-02-0002а

и 12-02-00009. Работа выполнялась на 6-м телескопе при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.552.11.7028, 16.518.11.7073, грант НШ-4308.2012.2). В работе использовались базы данных WEBDA, SIMBAD и VIZIER.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Hale, *Astrophys. J.* **28**, 315 (1908).
2. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **105**, 105 (1947).
3. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **62**, 62 (2007).
4. P. Renson and J. Manfroid, *Astronom. and Astrophys.* **498**, 961 (2009).
5. L. Mestel, *ASP Conf. Proc.* **248**, 3 (2001).
6. D. Moss, *ASP Conf. Proc.* **248**, 305 (2001).
7. G. Rudiger, R. Arlt, and R. Hollerbach, *ASP Conf. Proc.* **248**, 315 (2001).
8. I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **63**, 139 (2008).
9. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, V. Andretta, et al., in *Proc. of Intern. Conf. Magnetic Stars* (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2011), p. 14.
10. J. C. Kemp, J. B. Swedlund, J. D. Landstreet and J. R. P. Angel, *Astrophys. J.* **161**, 77 (1970).
11. I. I. Romanyuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 64 (2005).
12. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **65**, 347 (2010).
13. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **228**, 809 (1979).
14. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **41**, 421 (1980).
15. E. F. Borra, J. D. Landstreet, I. Thompson, *Astrophys. J. Suppl.* **53**, 151 (1983).
16. I. B. Thompson, D. N. Brown and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **64**, 219 (1987).
17. D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, D. N. Brown and I. B. Thompson, *Astrophys. J.* **323**, 325 (1987).
18. Yu. V. Glagolevskij, V. G. Klochkova and I. M. Kopylov, *Astronom. Zh.* **64**, 360 (1987).
19. I. I. Romanyuk, *Doctoral Dissertation in Mathematics and Physics* (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2004).
20. P. North and N. Cramer, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **58**, 387 (1984).
21. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin and E. Paunzen, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **372**, 1804 (2006).
22. I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev and E. A. Semenko, *Astrophysical Bulletin* **64**, 239 (2009).
23. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, E. Mason, et al., *Astronom. and Astrophys.* **450**, 777 (2006).
24. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, V. Andretta, et al., *Astronom. and Astrophys.* **470**, 685 (2007).
25. S. Hubrig, P. North, M. Scholler and G. Mathys, *Astron. Nachr.* **327**, 289 (2006).
26. J. H. Grunhut, G. A. Wade, W. L. F. Marcolino, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **400**, 94 (2009).

27. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **38**, 152 (1994).
28. O. Kochukhov and S. Bagnulo, *Astronom. and Astrophys.* **450**, 763 (2006).
29. S. Ammons, S. Robinson, J. Strader, et al., *Astrophys. J.* **638**, 1004 (2006).
30. S. Hubrig., N. Nesvacil, M. Scholler, et al., *Astronom. and Astrophys.* **440**, 37 (2005).
31. E. A. Semenko, private communication (2011).
32. D. W. Kurtz, V. G. Elkin, M. S. Cunha, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **372**, 286 (2006).
33. D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, in *Proc. of Intern. Conf. Magnetic Stars* (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2011), p. 104.
34. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Astrophysical Bulletin* **65**, 164 (2010).
35. I. I. Romanyuk, in *Proc. of Intern. Conf. Magnetic Stars* (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2011), p. 35.
36. O. Kochukhov, A. Lundin, I. Romanyuk and D. Kudryavtsev, *Astrophys. J.* **726**, 24 (2011).
37. F. van Leeuwen, *Astronom. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
38. R. Glebocki and P. Gnacinski, *ESA SP-560*, 571, (2005).
39. F. A. Catalano and P. Renson, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **127**, 421 (1998).
40. G. Wade, in *Proc. of Intern. Conf. Magnetic Stars* (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2011), p. 23.
41. Yu. Yu. Balega, V. V. Dyachenko, A. F. Maximov, et al., *Astrophysical Bulletin* **67**, 44 (2012).

MAGNETIC B-TYPE STARS OF THE MAIN SEQUENCE. I. FORMULATION OF THE PROBLEM AND SELECTION OF OBJECTS FOR OBSERVATIONS

I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin

This paper reviews the current state of the problem of magnetism in massive Main Sequence stars. Chemically peculiar Bp stars with enhanced silicon lines and anomalous helium lines in their spectra are shown to be the most promising targets for the observational verification of various mechanisms of the formation and subsequent evolution of magnetic fields in CP stars. A catalog of magnetic Bp stars, containing 125 objects is prepared. Applying different criteria, we compiled a variety of magnetic star samples, which were then used to analyze magnetic fields in objects of different ages. The results of this analysis show that massive stars generally have stronger fields in all the samples studied, and thus confirm earlier results based on smaller star samples. No tight relation is observed and the parameters of individual objects show a very large scatter about the mean relation. The strongest and most complex fields are found in the youngest Bp stars with ages below 30 Myr. Magnetic Bp stars generally rotate slower than normal B-type stars, except for the hottest objects with enhanced helium lines, which have normal rotation velocities. No systematic differences are found between the angular rotation velocities of Bp stars with anomalous helium and silicon lines. We discuss various criteria, which can be used to observationally test the alternative mechanisms of formation and evolution of magnetic fields in CP stars and, in particular, to quantitatively compare not only the magnitudes, but also the topology of fields in objects of different ages.

Keywords: *stars: chemically peculiar—stars: evolution—stars: magnetic field—stars: rotation*