

УДК 524.338.3

## ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ И СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД С ГЕЛИЕВЫМИ АНОМАЛИЯМИ (He-g, He-w)

© 2020 Ю. В. Глаголевский<sup>1</sup><sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 15 апреля 2019 года; после доработки 13 декабря 2019 года; принята к публикации 13 декабря 2019 года

Критически рассмотрены результаты ранних работ по исследованию магнитных звезд с аномальными линиями гелия. Рассматриваются проблемы, связанные с реликтовой теорией и сценарием формирования магнитных звезд. Особенность наших результатов исследований магнитных звезд заключается в том, что они получены на основании более 160 непосредственных оценок средних поверхностных магнитных полей  $B_s$  или полученных методом моделей. Трудность этой работы заключается в недостаточном пока количестве данных о звездах He-g. Вызывает проблему слишком сильное уменьшение величин  $v \sin i$  у звезд в момент внутренней перестройки.

Ключевые слова: *звезды: химически пекулярные*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В этой работе исследуются свойства магнитных He-g- и He-w-звезд, для которых наблюдательный материал постоянно пополняется. Рассматриваются проблемы, связанные с реликтовой теорией и сценарием формирования магнитных звезд Glagolevskij (2014b; 2017). Критически рассмотрены результаты ранних работ по исследованию магнитных звезд с аномальными линиями гелия. Они были выполнены, как правило, с использованием недостаточного количества данных, поэтому имеют низкую достоверность. Некоторые выводы сделаны без учета накопленных к тому времени наблюдательных данных. Особенность наших результатов исследований магнитных звезд заключается в том, что они получены на основании более 160 непосредственных оценок средних поверхностных магнитных полей  $B_s$  или полученных методом моделей. Часто применяемые средние квадратические величины продольного поля  $\langle B_e \rangle$  сильно зависят от ориентации звезд по отношению к наблюдателю. Их использование возможно только при большом количестве данных. В прилагаемом ниже обзоре результаты, которые подтверждены поздними наблюдениями, отмечены курсивом. Трудность этой работы заключается в недостаточном пока количестве данных о звездах He-g. В соответствии с результатами работ Michaud et al. (1987), Vauclair (1975) мы рассматриваем содержание гелия в зависимости от влияния на диффузию двух основных факторов: ветра (из-за лучевого давления) и гравитации. У He-g-звезд преобладает действие первого фактора, у He-w-

звезд — второго. Кроме того, вызывает проблему слишком сильное уменьшение величин  $v \sin i$  у звезд в момент внутренней перестройки, когда относительный радиус  $R/R_z > 1.75-2.2$  (радиус звезды относительно ее радиуса на линии нулевого возраста ZAMS (Zero Ages Main Sequence)). Величина  $R/R_z$  пропорциональна  $\lg g$ . Приведенные в этой работе графики построены в основном по данным работы Glagolevskij (2019). Характерной чертой зависимостей является большой разброс точек на них, который только частично обусловлен ошибками и недостаточным количеством данных. Поэтому рассматриваемые графики, как правило, построены методом скользящего среднего.

### 2. ОБЗОР НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В ИССЛЕДОВАНИИ ЗВЕЗД С АНОМАЛЬНЫМИ ЛИНИЯМИ ГЕЛИЯ

1942 г. Аномально сильные линии гелия обнаружены в звезде HD 124448 (Popper 1942).

1974 г. Один из ранних обзоров по проблеме звезд с аномальными линиями гелия сделан в работе Jaschek and Jaschek (1974). Отмечены общие свойства He-w-звезд со звездами Si+SrCrEu-группы: 1) медленное вращение, 2) отсутствие двух звезд с одинаковым химическим составом и одинаковым магнитным полем. Это был важнейший для физики магнитных звезд вывод, который объясняет особенности их происхождения из намагниченных протозвездных облаков и разнообразие их свойств.

О He-g-объектах в это время мало что было известно. Это был тот период, когда исследовались,

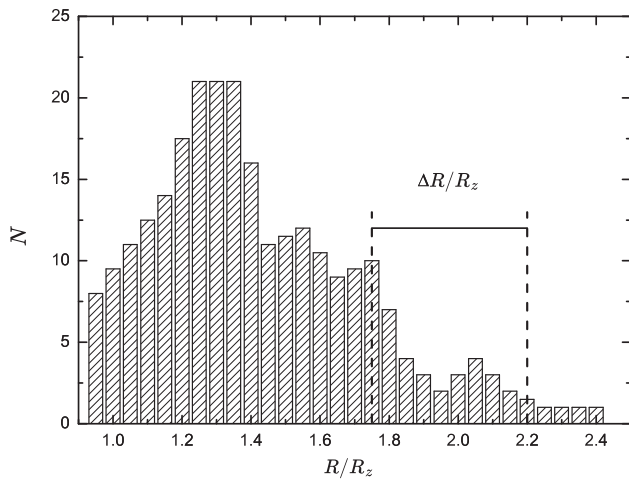


Рис. 1. Распределение числа гелиевых звезд поперек полосы Главной последовательности.

в основном, особенности химического состава магнитных звезд.

1974 г. В работе Osmer and Peterson (1974) изучены свойства He-г-звезд, получены интересные для теории их эволюции результаты:

- 1) температуры He-г-звезд соответствуют спектральным типам B0–B2,
- 2) величины гравитации соответствуют ZAMS,
- 3) скорости вращения обычно низкие, по сравнению с нормальными звездами,
- 4) He-г-звезды на Главной последовательности продолжают группу магнитных CP-звезд в сторону высоких температур.

Что касается второго пункта, то это не так. На рис. 1 Glagolevskij (2019) показано распределение звезд He-г+He-w поперек полосы ГП (Главная последовательность). Очевидно, что максимум распределения находится ближе к ZAMS от центра, но не на ZAMS. Пункты 1, 3 и 4 хорошо подтверждаются данными рис. 2 и 3 Glagolevskij (2018a; b). Эти рисунки показывают средние температуры, поверхностное магнитное поле, а также средние периоды вращения у звезд разных типов пекулярности.

Сделаем важное замечание относительно области  $R/R_z = 1.75-2.2$  на рис. 1 и других, которую мы отмечаем вертикальными линиями. Она показывает период эволюции, в котором происходит внутренняя перестройка звезд.

1975 г. Наблюдения Landstreet et al. (1975) привели к предварительным выводам о том, что быстро вращающиеся Ap-звезды имеют систематически меньшие магнитные поля, чем медленно вращающиеся; некоторые из них могут быть без заметных полей. Более отчетливое представление

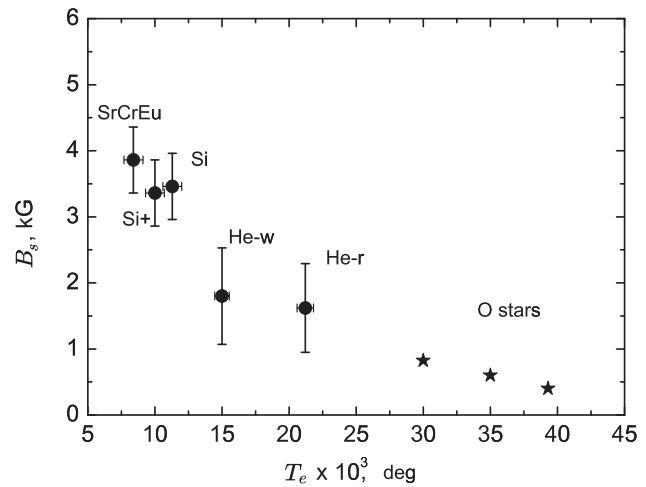


Рис. 2. Средние величины среднего поверхностного магнитного поля  $B_s$  у звезд разных типов пекулярности.

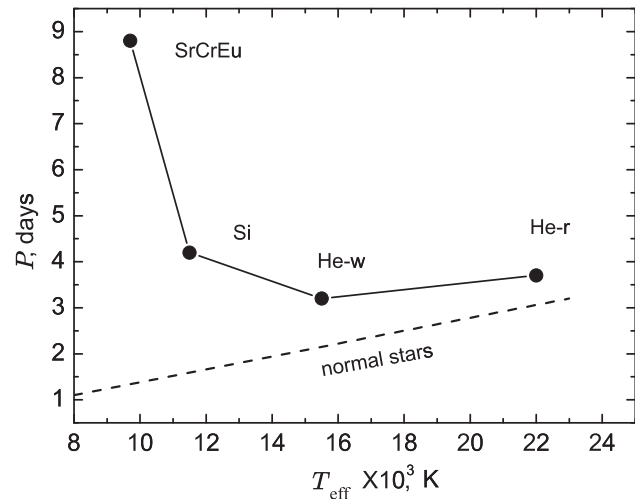


Рис. 3. Средние величины периодов вращения  $P$  у звезд разных типов пекулярности.

об этом можно получить из рассмотрения рис. 2 и 3 Glagolevskij (2018a; b). Хорошо видно, что быстрые ротаторы He-г+He-w-типа имеют в среднем вдвое меньшую величину магнитного поля, чем более медленные Si+SrCrEu-звезды. Этот факт мы объясняем в основном тем, что у них больше радиус, больше масса, они быстрее эволюционируют, в результате чего потеря момента вращения на стадии протозвезд произошла в меньшей степени, а релаксация магнитного поля не успела произойти в такой же степени (Glagolevskij 2018a) (см. разделы 4 и 6).

1976 г. Авторы работы Wolff and Wolff (1976) пришли к выводу, что в среднем скорости вращения ранних и средних Bp-звезд больше, чем поздних Bp и ранних Ap-звезд. Этот результат хорошо заметен

на рис. 3. В предыдущем абзаце мы обсудили это свойство.

Далее, авторы делают вывод, что «среди ранних В-звезд магнитные переменные встречаются гораздо реже, чем среди поздних В и ранних А-звезд». По нашим данным, сделанным на основании работы Glagolevskij (2018a), эта зависимость действительно существует, но она слабая. Надо учитывать, что гелиевые He-g+He-w магнитные звезды имеют поле более двух раз слабее (рис. 2), чем у Si+SrCrEu-объектов, поэтому среди них много звезд с полем ниже порога обнаружения.

Далее авторы отмечают, что имеются наблюдательные данные о том, что вращение магнитных звезд подвергается торможению на ГП, и что типичное время торможения на ГП для получения периода более 3 дней, происходит за  $10^8$  лет, подтверждая их более ранний результат. Наше возражение состоит в том, что когда магнитные звезды приходят на ZAMS, они уже имеют малые скорости вращения. Это видно из рис. 4а, где на ZAMS у гелиевых звезд  $v \sin i \approx 60 \text{ км с}^{-1}$ , что много меньше, чем у нормальных звезд. Кремниевые звезды на ZAMS имеют скорости  $v \sin i \approx 40 \text{ км с}^{-1}$  (рис. 4б) (разброс точек большой, потому что влияет эффект наклона звезд к лучу зрения). Анализ последних наблюдательных данных показывает, что потеря момента вращения произошла вероятнее всего на стадии гравитационного коллапса (Glagolevskij 2018a; b) путем магнитного торможения (Mouschovias and Paleologou 1979). Но на ГП период вращения тоже увеличивается в некоторой степени вследствие эволюционного роста радиуса (рис. 5) (разброс точек большой, потому что много звезд с очень большими периодами вращения, до  $30\,000^d$ ). К сожалению, для гелиевых звезд мало данных в области  $R/R_z > 1.75$  (рис. 5а), поэтому приводим зависимость для Si-звезд, близких по массе рис. 5б. Она демонстрирует некоторый рост периода вращения (попутно заметим, что для Si-звезд область внутренней перестройки происходит несколько позднее).

Авторы работы Wolff and Wolff (1976) отмечают, что магнитные поля Ap-звезд, в среднем, меньше, чем у быстрых массивных звезд. Этот результат подтверждает работа Landstreet et al. (1975) и хорошо виден на рис. 2. Авторы объясняют это тем, что в короткопериодических звездах быстрое вращение может создавать циркуляционные токи, которые могут запутывать, подавлять магнитные силовые линии внутри звезды. Наше объяснение этого свойства другое (см. 1975 г., разделы 4 и 6).

1978 г. В работе Landstreet and Borra (1978) отмечается, что почти все He-g-звезды имеют магнитное поле. Этот вывод следует оценить как

утверждение о продолжении последовательности магнитных звезд в сторону массивных объектов, что подтверждает вывод в работе Osmer and Peterson (1974).

1979 г. Borra and Landstreet (1979) исследовали поведение  $R$ -индекса и нашли, что он зависит от величины магнитного поля (характеризует интенсивность линии гелия  $\lambda 4026 \text{ \AA}$ ), т.е. замечена зависимость содержания гелия от величины магнитного поля. Наличие этой зависимости подтверждено в серии наших исследований (см. разделы 9, 10). В работе Borra and Landstreet (1979) сделан также вывод, что звезды с сильными линиями гелия продолжают феномен Ap-звезд в сторону высоких температур, что подтверждают работы Landstreet and Borra (1978), Osmer and Peterson (1974).

1980 г. В работе Borra and Landstreet (1980) исследованы звезды всех типов пекулярности. Сделан вывод, что форма фазовых зависимостей магнитного поля у He-g-звезд близка к синусоиде, смещение из центра диполя небольшое. Наше моделирование магнитных полей гелиевых звезд (Glagolevskij 2016) показало, что это не так. Из 24 He-g- и He-w-звезд 5 имеют двух-дипольную конфигурацию поля, у 11 из них наблюдается значительное смещение диполей из центра, одна звезда имеет трех-дипольную магнитную структуру (HD 37776). В работе Borra and Landstreet (1980) найдено также, что фотоэлектрические измерения поля по линии  $H\beta$  имеют тенденцию быть более гармоническими, чем фотографические кривые  $B_e$ . Сейчас это объясняют тем, что измерения по линиям водорода не подвержены влиянию неоднородного распределения химических элементов по поверхности. В работе Borra and Landstreet (1980) приводятся незначительные статистические данные, которые могут свидетельствовать о том, что быстрые ротаторы могут иметь поверхностное магнитное поле меньше, чем у медленных ротаторов. Это свойство мы обсуждали выше (1975, 1976 г. Landstreet et al. (1975), Wolff and Wolff (1976)). Однако некоторые очень быстрые ротаторы ( $P < 1^d$ ) имеют экстремальные поля, сравнимые с максимальными величинами медленных ротаторов. Действительно, из 75 звезд с аномальными линиями гелия (таблица 1) пять имеют поле больше 5000 Гс (Glagolevskij 2019), несмотря на то что среднее поле их вдвое меньше, чем у объектов Si+SrCrEu-типа. Проблема экстремальных магнитных полей существует у звезд всех типов пекулярности. Авторы не нашли сильной корреляции (или антикорреляции) между величиной поля и скоростью вращения. На самом деле она существует, мы обсуждаем эту проблему в разделе 6 и рис. 6а,б.

1980, 1981 гг. В работах Groote et al. (1980), Groote and Kaufmann (1981) исследовано явление выдуваемого газа, которое приводит к

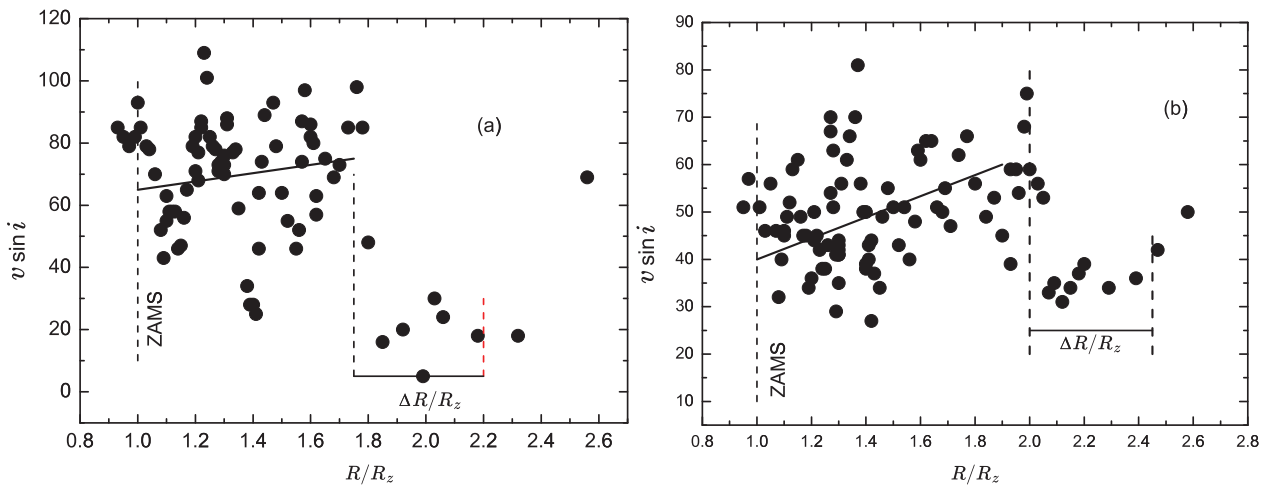


Рис. 4. Изменение скоростей вращения магнитных звезд при эволюционном движении их поперек полосы Главной последовательности. а) He-g- и He-w-звезды, б) Si-звезды.

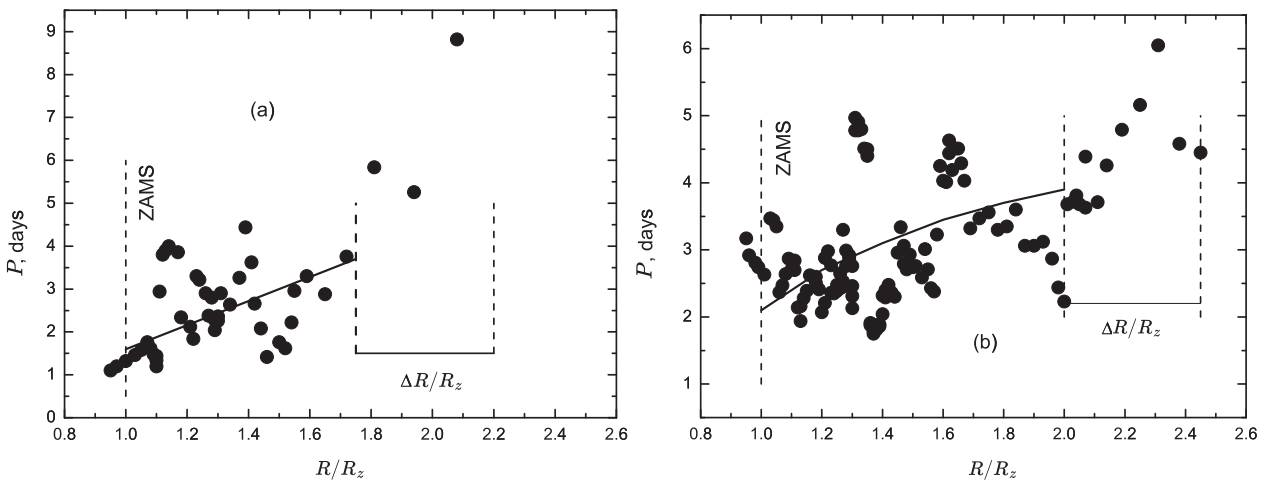


Рис. 5. Изменение периода вращения магнитных звезд при их движении поперек полосы Главной последовательности. а) гелиевые звезды, б) Si+SrCrEu-звезды.

ИК-экссессу в He-g-звездах. Найдено, что: 1) инфракрасный экссесс коррелирует с величиной магнитного поля, 2) очевидно, что существует оболочка вдоль экватора, 3) гелиевые звезды большой массы это самые быстрые ротаторы (см. 1976 г. Wolff and Wolff (1976)). Наши данные, приведенные на рис. 3, хорошо демонстрируют последнее свойство. Мы объясняем это тем, что на стадии магнитного торможения массивные протозвезды потеряли момент вращения в меньшей степени, чем маломассивные протозвезды, из-за в среднем более слабого поля, большой массы и более короткого времени эволюции (1976 г., разделы 6, 7).

1981 г. Сделан обзор Jaschek and Jaschek (1981) предыдущих исследований. Делается вывод, что He-g- и He-w-звезды родственны Si+SrCrEu-

объектам, т.е. они продолжают последовательность магнитных звезд в сторону высоких температур, подтверждая вывод работ Vogra and Landstreet (1979; 1980), Osmer and Peterson (1974). С современной точки зрения это значит, что происхождение и ход эволюции у них одинаковые.

1981 г. В работе Vogra (1981) изучены магнитные поля четырех Si- и девяти He-w-звезд в ассоциации Oгion OBI. Сделан вывод, что магнитные поля молодых звезд с возрастом  $t = 5 \times 10^6 - 10^7$  лет сильнее в три раза, чем имеют старые звезды с  $t = 10^7 - 10^8$  лет. Опыт исследования магнитных звезд показывает, что при столь слабой статистике невозможно получить правильный ответ. На самом деле проблема сложнее, и она заключается в следующем. Выше мы частично уже обсуждали этот вопрос. На рис. 2 видно, что He-g+He-w-

звезды, имеющие возраст меньше, чем у звезд Si+SrCrEu-типа, обладают на самом деле в среднем вдвое меньшим полем. Но внутри одной ассоциации, где возраст звезд примерно одинаковый, играет роль изменения поля по мере эволюционного продвижения звезд поперек полосы ГП. Поле около ZAMS растет, достигает максимума, потом начинает уменьшаться вследствие увеличения радиуса. После достижения двойного радиуса в звезде происходит внутренняя перестройка, в результате которой радиус уменьшается, а магнитное поле растет. Массивные и маломассивные звезды проходят этот путь с разной скоростью. Поэтому без уточнения места звезды на эволюционном треке невозможно объяснить то, что нашел автор. Далее автор утверждает, что молодые магнитные звезды вращаются быстрее, чем их более старые аналоги, что подразумевает магнитное торможение на ГП. Это не так. Действительно, He-г звезды вращаются быстрее, чем SrCrEu-объекты, и они действительно моложе. Внутри каждой группы по мере эволюционного движения поперек полосы ГП  $v \sin i$  увеличивается вследствие эволюционного увеличения радиуса (Glagolevskij 2019). На ГП период вращения тоже увеличивается примерно в три раза вследствие эволюционного роста радиуса (рис. 5а). Для сравнения на рис. 5b приведена такая же зависимость для более многочисленных Si-звезд, которая тоже демонстрирует некоторый рост периода вращения. Но максимальное торможение происходит в фазе «до ГП» (Glagolevskij 2018a) (см. 1987 г.), поэтому на ZAMS их скорости вращения меньше, чем у нормальных звезд.

1983 г. Наблюдения Walborn (1983) подтверждают заключение работы Thompson et al. (1987) о том, что магнитные поля He-г-звезд, в среднем, примерно в три раза сильнее, чем у классических Ar-звезд, в то время как напряженность поля He-w-объектов являются промежуточными между ними. Это утверждение неверно, как мы видели при обсуждении рис. 2 (см. 1980, 1981, 1985 гг.).

1983 г. Одной из пионерских работ, посвященных анализу наблюдательных данных о магнитных полях CP-звезд, является исследование в Borra et al. (1983). Изучено 30 He-w-звезд. Магнитное поле было обнаружено впервые или подтверждено в 12 звездах, девять из которых относятся к Si и He-w подклассам. Однако этого количества звезд слишком мало для уверенных выводов. Тем не менее сделан правильный вывод, что магнитные He-w-звезды представляют собой со звездами Ar и He-г единое семейство. Этот результат подтверждает аналогичный вывод, сделанный ранее в Borra and Landstreet (1979), Jaschek and Jaschek (1981), Landstreet and Borra (1978), Osmer and Peterson (1974) (см. 1974, 1978, 1979, 1981 гг.). Найдено, что доля He-w-звезд с большими полями (более 1 кГс)

Таблица 1.

| Тип пекулярности      | He-г | He-w | Si, Si+ | SrCrEu |
|-----------------------|------|------|---------|--------|
| Всего звезд           | 49   | 83   | 251     | 206    |
| Звезд с большим полем | 6    | 13   | 30      | 90     |
| %                     | 12   | 16   | 12      | 44     |

оказывается больше, чем у Ar-звезд, но меньше, чем у He-г-звезд. Поскольку этот вывод важен для теории эволюции приведем последние данные, полученные на основании работы Glagolevskij (2019) и показанные в таблице 1. Оказывается, доля звезд с полем  $B_s < 1000$  Гс примерно одинаковая у звезд He-г-, He-w-, Si-типов, но у SrCrEu-звезд их втрое больше. Это не подтверждает вывод в Borra et al. (1983) и указывает на существование новой проблемы. Наше объяснение состоит в том, что поскольку массивные магнитные звезды эволюционируют существенно быстрее, то магнитное поле не успевает сформироваться в той же степени, как у мало массивных объектов. Возможно, последние формируются из наиболее характерных размеров намагниченных протозвездных облаков, поэтому у них максимальное поле может быть больше.

1985 г. В работе Glagolevskij and Chunaikova (1985) авторами сделан критический обзор данных по He-г-звездам, накопившихся к тому времени, и проведена их предварительная интерпретация. Кратко основные результаты заключаются в следующем:

1) По-видимому, спектральная и фотометрическая переменность у He-г-звезд слабее, чем у Si+SrCrEu-группы, но отмечается такое же большое разнообразие химических, магнитных и других особенностей.

2) Скорости вращения гелиевых звезд выше, чем у Si+SrCrEu, — это мы уже обсуждали выше (см. Borra and Landstreet (1980), Wolf and Wolf (1976) и рис. 3). Зависимость  $v \sin i$  от возраста в рассматриваемой работе не была замечена, но в работе Glagolevskij (2019) зависимость  $v \sin i (R/R_z)$  была найдена для звезд всех типов пекулярности. Такая зависимость из Glagolevskij (2019) для звезд He-г+He-w приведена на рис. 4. (Оказывается, величина  $v \sin i$  растет по мере движения звезд поперек полосы ГП вследствие роста радиуса, затем при  $R/R_z > 1.75$  она уменьшается в 4 раза в момент перестройки внутренней структуры звезды и уменьшения радиуса вследствие гравитационного сжатия).

3) Средняя величина поля у гелиевых звезд, по-видимому, меньше, чем у Si+SrCrEu. Это был

правильный вывод, последняя зависимость приведена на рис. 2.

4) Утверждается, что магнитное поле у старых He-w-звезд меньше, чем у молодых. Сделана попытка объяснить это следствием омического распада, но в настоящее время мы считаем, что на самом деле падение поля на ГП со временем происходит вследствие эволюционного роста радиуса. Но ситуация на самом деле сложнее (см. зависимость  $B_s(R/R_z)$  на рис. 9).

5) Оказалось, что в распределении звезд по возрасту имеется максимум, приходящийся на  $\lg t = 6.5-7.0$ . Действительно, этот максимум виден на рис. 1, взятом из работы Glagolevskij (2019). Характерное распределение звезд  $N(R/R_z)$  обсуждается в разделе 4.

6) Гелиевые звезды чаще встречаются среди молодых скоплений, чем Si+SrCrEu. Наше мнение состоит в том, что в молодых скоплениях Si+SrCrEu-звезды еще не дошли до ГП.

7) Найдена зависимость параметра  $R$  (интенсивность линии He) от магнитного поля, корреляция значимая, ее коэффициент  $R = 0.77 \pm 0.14$ . Наличие зависимости содержания He от магнитного поля подтвердилось в дальнейших работах Glagolevskii et al. (1990), Glagolevskij and Chunakova (1985), Glagolevskij and Kopylova (1990; 1991), Glagolevskij et al. (1992), Zboril et al. (1994) (раздел 9).

1987 г. Изучены кривые блеска 25 Si+SrCrEu- и He-w-звезд (North 1987). Основной результат заключается в том, что горячие магнитные звезды не теряют момент вращения в течение их времени жизни на ГП и что сохранения углового момента достаточно, чтобы объяснить небольшое увеличение периода с возрастом. Момент вращения теряется до того, как звезда выходит на ZAMS. Более точно ситуация рассмотрена в разделе 4, рис. 4.

1987 г. Bohlender et al. (1987) провели подробный анализ накопившихся наблюдательных данных, которых к тому времени, вообще говоря, было еще слишком мало. Поэтому полученные зависимости оказались недостаточно надежными. Девять из одиннадцати He-g-звезд имеют большие магнитные поля. Магнитные кривые, измеренные по линии He I 5876 Å для четырех звезд, оказались идентичными полученным по H $\beta$ . Это важный результат. Далее утверждается, что:

1) В среднем гелиевые звезды имеют поля примерно в три раза большие, чем классические магнитные Ap-звезды. Это не так. Выше мы обсуждали рис. 2, который показывает противоположное соотношение.

2) Звезды He-g с большими и малыми значениями  $v \sin i$  имеют сравнимую напряженность поля, в отличие от возможной антикорреляции между  $v \sin i$  и напряженностью поля, найденной для Ap-звезд. На самом деле зависимость скорости вращения от величины магнитного поля оказывается сложной рис. 6a,b. Эти зависимости подробно рассмотрены в разделе 6.

3) Значительная часть наблюдаемых до настоящего времени гелиевых звезд имеет постоянные магнитные поля, что указывает на небольшой наклон магнитной оси к оси вращения. Это не так, все гелиевые магнитные звезды являются наклонными магнитными ротаторами и имеют типичный вид фазовых зависимостей магнитного поля (Glagolevskij 2016).

4) Распределение звезд по  $v \sin i$  для He-g-звезд аналогично распределению нормальных ранних звезд B-типа, подтверждая относительную слабость магнитного торможения. Это не так. Такие распределения изучены, в частности, в работе Glagolevskij (2019) и показаны на рис. 7a и b. Различия значительны (см. раздел 15). Но действительно, периоды вращения He-g-звезд меньше отличаются от нормальных, чем звезды SrCrEu-типа (см. рис. 3 Glagolevskij (2018b)). Малое отличие скоростей вращения у He-g- и He-w-звезд от нормальных возникает, скорее всего, потому, что на стадии магнитного торможения массивные протозвездные облака теряют момент вращения в меньшей степени, чем маломассивные протозвезды, вследствие более слабого поля, большой массы и более короткого времени эволюции (раздел 5b).

5) Пять из восьми He-g-звезд с заметными полями имеют постоянное или неререверсивное магнитное поле, указывающие на малую величину угла наклона оси вращения к оси диполя  $B(\beta = 90^\circ - \alpha)$ . На самом деле гелиевые звезды ведут себя в этом отношении аналогично звездам других типов пекулярности. Они тоже имеют характерный избыток звезд с  $\alpha = 0-20^\circ$  (рис. 8a, b).

6) Рассмотрены свойства параметра  $r$ , введенного Landstreet (1970), Preston (1967; 1971), который варьируется от  $-1$  для поля с равными положительными и отрицательными экстремумами до  $+1$  для постоянных полей. Они рассчитали это значение для выборки Ap-звезд с известными магнитными кривыми и пришли к выводу, что полученное распределение  $r$  соответствует бимодальной популяции звезд, имеющей в среднем  $\alpha = 20^\circ$  или  $80^\circ$ . Наше исследование показывает, что распределение углов наклона у He-g-звезд практически такое же как и у остальных Bp- и Ap-звезд (рис. 7a и b Glagolevskij (2016)), т.е. наблюдается преобладание углов  $\alpha = 0-20^\circ$ . Но среди звезд

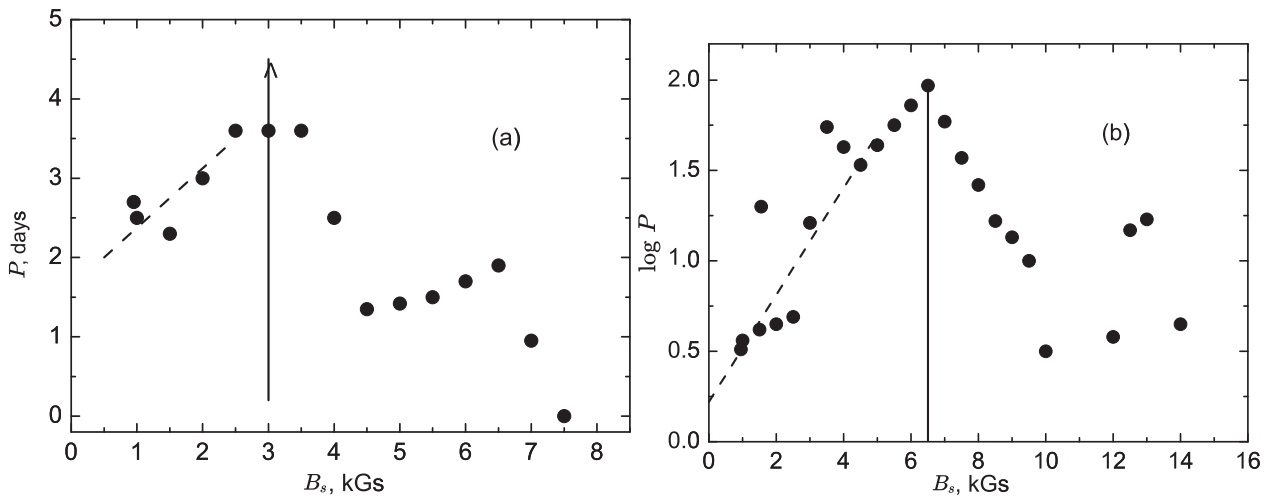


Рис. 6. Зависимость периода вращения от среднего поверхностного магнитного поля. а) гелиевые звезды, б) Si+SrCrEu-звезды.

Si+SrCrEu-группы больше объектов с  $\alpha = 20-90^\circ$ . Это свойство обсуждается в разделе 13.

1987 г. Авторы Thompson et al. (1987), предположили, что магнитные поля пекулярных звезд с  $(U - V) < -0.80$  (соответствующие к спектральному типу около B4) сильнее, чем более холодных магнитных звезд. Это утверждение неверно, как мы видели при обсуждении рис. 2.

1988 г. В работе Glagolevskij (1988) обсуждаются проблемы потери момента вращения магнитными звездами:

- 1) Обнаружена зависимость — чем меньше масса звезд, тем больше их период вращения (современная зависимость представлена на рис. 3 Glagolevskij (2018b)).
- 2) Показано, что чем больше средний возраст звезд, тем больше их средний период вращения (это утверждение фактически повторяет предыдущее).
- 3) Из всех звезд массивные He-г- и He-w-звезды имеют минимальное отличие скоростей вращения от нормальных звезд (рис. 3 демонстрирует это).
- 4) Потеря момента вращения произошла до ZAMS, что подтверждает вывод, сделанный ранее в North (1987).

Современные данные показывают, что на ZAMS скорости вращения звезд типично малые (см. рис. 4). Но на ГП тоже происходит потеря момента вращения в небольшой степени (раздел 8, рис. 5). Средняя ориентация магнитных диполей звезд He-w и He-г такая же, как и у Si+SrCrEu-объектов. Это свойство хорошо видно на рис. 8a, 8b Glagolevskij (2016). Одинаковый вид зависимостей свидетельствует об отсутствии изменений

структур магнитного поля с возрастом и отсутствии крупномасштабных движений внутри магнитных звезд, хотя SrCrEu-объекты имеют возраст до двух порядков больше, чем He-г-звезды.

Малое отличие скоростей вращения у He-г- и He-w-звезд от нормальных (рис. 3 Glagolevskij (2019)), вероятно, возникает потому, что на стадии магнитного торможения массивные протозвездные облака теряют момент вращения в меньшей степени, чем маломассивные протозвезды вследствие более слабого поля, большей массы и более короткого времени эволюции.

1990–1994 г. В серии работ Glagolevskij et al. (1990), Glagolevskij and Chunakova (1985), Glagolevskij and Kopylova (1990; 1991), Glagolevskij et al. (1992), Zboril et al. (1994) найдено, что содержание He/H пропорционально величине магнитного поля у звезд He-г. Этот результат подтверждает наличие зависимости параметра  $R$  от величины магнитного поля (1979 г. Borra and Landstreet (1979)), хотя разброс точек на графике велик. Предполагается, что зависимость возникает потому, что поле подавляет микротурбулентцию, облегчая диффузию гелия под действием ветра (Vauclair 1975) (раздел 9). Нечеткость корреляции, вероятно, происходит вследствие того, что содержание гелия зависит не только от величины магнитного поля, но также от величины ветра, который усиливается по мере продвижения звезды к верхней части полосы ГП, а также вследствие разной ориентации магнитных структур внутри звезд, ориентации звезды относительно наблюдателя, вращательной модуляции и др. В работах Glagolevskij et al. (1990), Glagolevskij and Chunakova (1985), Glagolevskij and Kopylova (1990; 1991), Glagolevskij et al. (1992), Zboril et al. (1994) утверждается, что у звезд He-г на

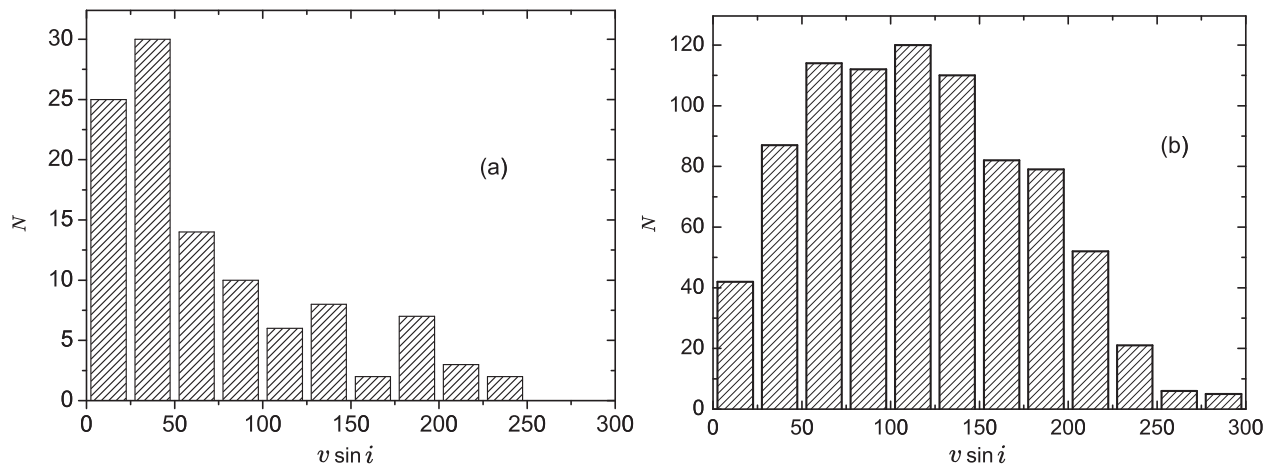


Рис. 7. Распределение звезд по скоростям вращения  $v \sin i$ . а) гелиевые звезды, б) нормальные звезды.

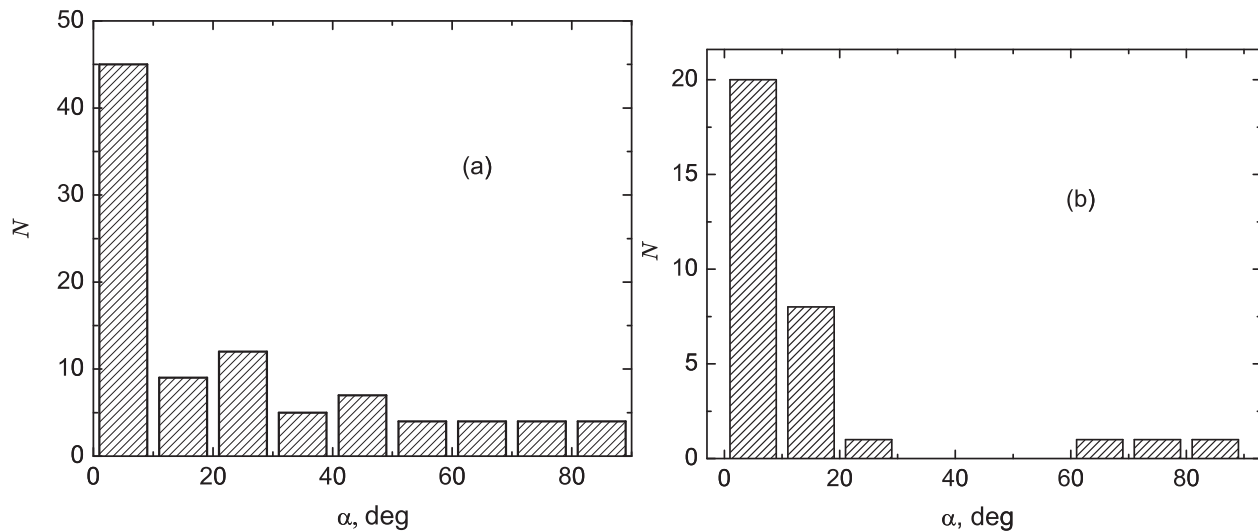


Рис. 8. Распределение магнитных звезд по углам  $\alpha$ . а) Si+SrCrEu-звезды, б) гелиевые звезды.

ZAMS содержание He/H близко к нормальному, но по мере эволюционного движения звезд поперек полосы ГП содержание растет. После достижения верхней части полосы ГП содержание гелия начинает падать. Это утверждение неточно. Ситуация на самом деле сложнее (см. разделы 9, 10).

1998–2000 гг. В работах Glagolevskij (1998), Leushin et al. (2000) подтверждено увеличение содержания гелия He/H у звезд He-г по мере эволюции поперек полосы ГП. Содержание нормальное на ZAMS, затем оно увеличивается до  $R/R_z = 1.75$ . После этого оно до некоторой степени уменьшается (на самом деле ситуация сложнее, см. разделы 9, 10 и рис. 14). Зависимость прерывается на  $R/R_z = 2$  вероятно, вследствие малого количества данных. Гелий скапливается в атмосфере под действием ветра (Vauclair 1975), который усиливаются по мере увеличения радиуса

звезд. В момент  $R/R_z > 1.75$ , вероятно, He начинает выметаться вследствие усиления ветра (Zboril et al. 1997) и исчезает на поверхности полностью в момент  $R/R_z = 2$ . Более подробно ситуация обсуждается в разделах 9, 10.

2000 г. Методом моделей атмосфер исследованы 14 He-w-звезд (Leushin et al. 2000). По мере эволюции поперек полосы ГП содержание He/H уменьшается и становится минимальным на  $R/R_z = 1.4$ . Преодолев минимум, содержание гелия начинает увеличиваться и на  $R/R_z = 1.7–1.8$  зависимость прерывается. Сделан вывод, что ZAMS является тем моментом эволюции, в котором формируются гелиевые и другие магнитные химически пекулярные звезды (подробнее ситуация рассмотрена в разделе 11).

2003 г. Исследовано распределение He-г- и He-w-звезд по  $v \sin i$  (Glagolevskij and Gerth 2003).



Найдено, что относительное число этих звезд растет в сторону малых скоростей вращения (такая же закономерность наблюдается и среди звезд других типов пекулярности, в том числе CP-звезд без поля (Glagolevskij 2017)). Найдены признаки того, что магнитное поле не влияет на эту закономерность. Утверждается, что только от скорости вращения зависит формирование химически пекулярных звезд и сохранение реликтового магнитного поля. Это подтверждает вывод в Abt and Morrell (1995) о том, что «вращение звезд является единственным фактором, который определяет, будет или нет у звезды аномальный спектр».

2004 г. Методом моделей атмосфер исследована He-w-звезда HD 217833 (Glagolevskij et al. 2004). Отмечена слишком малая микротурбулентная скорость  $V_t = 0.75 \pm 1.00 \text{ км с}^{-1}$ , возникающая, вероятно, вследствие подавления ее магнитным полем. Такой же вывод сделан и для He-g-звезд в Leushin et al. (2000). Подавление микротурбулентности улучшает условия диффузии, приводя к усилению химических аномалий. Содержание гелия у He-w-звезд, по-видимому, уменьшено уже до ZAMS, но оно еще более уменьшается по мере эволюции поперек полосы ГП. Минимум содержания наблюдается на  $R/R_z \approx 1.4$ , после чего оно снова увеличивается (обсуждение последних данных см. в разделах 11, 12).

2005–2007 гг. При исследовании химического состава He-w-звезд Glagolevskij et al. (2006a; 2007b; 2006b; 2004) обнаружено между ними общее свойство — слабость микротурбулентных скоростей, которая, вероятно, происходит вследствие подавления их магнитным полем. Очевидно, это приводит к усилению диффузии гелия внутрь звезды под действием гравитации (Alecian and Vauclair 1981). Например, у звезд HD 21699 и HD 217833 содержание гелия в 34 и 64 раза меньше солнечного. Однако оказалось, что зависимость содержания He и других элементов от магнитного поля слабая, разброс точек велик. Интересно также то, что значительные химические аномалии встречаются в звездах со слабым полем.

Отдельные звезды имеют быстрое вращение, т.е. стабильные атмосферы могут быть и у быстрых ротаторов. Предполагается, что медленное вращение He-w звездам «досталось» от протозвездных облаков (подробнее в разделе 7b).

2007 г. Работа Romanyuk and Semenko (2007) посвящена исследованию особенностей вращения магнитных CP-звезд. Основные выводы следующие:

- 1) Среди маломассивных звезд SrCrEu-типа нет быстрых ротаторов.
- 2) Поля сложной конфигурации встречаются только у быстрых ротаторов.
- 3) Величины магнитного поля медленных ротаторов в два раза меньше, чем у быстрых.

Мы не согласны ни с одним из этих утверждений. Замечание по первому пункту: среди SrCrEu-объектов 6% имеют периоды  $P < 1^d$ , а среди массивных объектов быстрых ротаторов 20% (Glagolevskij 2017). По второму пункту: звезды со сложными структурами магнитных полей имеют средний период вращения  $P = 4^d4$ , а простые одно-дипольные структуры  $P = 5^d6$  (Vorra and Landstreet 1979), различие находится в пределах статистического разброса. Наконец, средние величины магнитных полей у гелиевых звезд более чем вдвое меньше, чем у Si+SrCrEu-звезд (рис. 2). Уникально большие величины магнитного поля ( $B_s > 5 \text{ кГс}$ ) среди быстро вращающихся гелиевых звезд встречаются в 9% случаев, а среди медленных ротаторов у 34% (результаты получены на основании данных Glagolevskij (2019)).

2009 г. В работе Bychkov et al. (2009) приводятся данные о «магнетизации» MA-звезд разных типов пекулярности. Наши данные поддерживают полученные результаты для всех типов звезд, кроме He-g+He-w-объектов. На рис. 2, полученном для более 200 звезд, видно, что среднее поверхностное магнитное поле  $B_s$  обратно пропорционально мас-

Таблица 2.

| Звезда | Тип  | $P$ , сут. | $\langle B_e \rangle$ , Гс | $B_s \langle B_e \rangle$ | $B_s$ , Гс | Ref.                |
|--------|------|------------|----------------------------|---------------------------|------------|---------------------|
| (1)    | (2)  | (3)        | (4)                        | (5)                       | (6)        | (7)                 |
| 3360   | He-g | 5.37       | 33                         | 73                        | 294        | Glagolevskij (2019) |
| 5737   | He-w | 21.6       | 246                        | 541                       | 319        | Glagolevskij (2019) |
| 19400  | He-w | —          | 120                        | 266                       | —          | —                   |
| 19805  | He-w | —          | 71070                      | 2354                      | —          | —                   |
| 21699  | He-w | 2.47       | 740                        | 1628                      | 6150       | Glagolevskij (2019) |

Таблица 2. (Продолжение)

| Звезда | Тип   | $P$ , дни | $\langle B_e \rangle$ , Гс | $B_s(\langle B \rangle)$ | $B_s$ , Гс | Ref.                |
|--------|-------|-----------|----------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| (1)    | (2)   | (3)       | (4)                        | (5)                      | (6)        | (7)                 |
| 22470  | He-w  | 1.94      | 743                        | 1635                     | 2350       | Glagolevskij (2019) |
| 22920  | He-w  | 3.95      | 249                        | 548                      | —          | —                   |
| 23408  | He-r  | —         | 410                        | 902                      | —          | —                   |
| 28843  | He-w  | 1.37      | 344                        | 757                      | 580        | Glagolevskij (2019) |
| 35298  | He-w  | 1.85      | 2230                       | 4906                     | 2886       | Glagolevskij (2019) |
| 35456  | He-w  | 0.28      | 615                        | 1353                     | 1643       | Glagolevskij (2019) |
| 35502  | He-w  | 1.69      | 1490                       | 3278                     | 6500       | Glagolevskij (2019) |
| 35912  | He-r  | —         | 551                        | 1212                     | —          | —                   |
| 36916  | He-w  | 1.56      | 628                        | 1382                     | —          | —                   |
| 36429  | He-w  | —         | 425                        | 935                      | —          | —                   |
| 36430  | He-r  | —         | 260                        | 572                      | —          | —                   |
| 36485  | He-r  | 1.48      | 2330?                      | 5126                     | 5890       | Glagolevskij (2019) |
| 36526  | He-w  | 1.54      | 2130                       | 4686                     | 3896:      | —                   |
| 36540  | He-w  | 2.18      | 470                        | 1034                     | —          | —                   |
| 36629  | He-w  | 5.01      | 859                        | 1890                     | 4570       | Glagolevskij (2019) |
| 36668  | He-w  | 2.12      | 900                        | 1980                     | 1755:      | Glagolevskij (2019) |
| 36916  | He-w  | —         | 600                        | 1320                     | 627        | Glagolevskij (2019) |
| 37017  | He-r  | 0.90      | 1650                       | 3630                     | 2144       | 5                   |
| 37041  | He-r? | 3.14      | 790                        | 1738                     | 1811:      | —                   |
| 37043  | He-w  | —         | 0                          | 0                        | —          | —                   |
| 37058  | He-w  | 14.62     | 793                        | 1745                     | 2665       | Glagolevskij (2019) |
| 37129  | He-w  | —         | 0                          | 0                        | —          | —                   |
| 37140  | He-w  | —         | 450                        | 990                      | —          | —                   |
| 37151  | He-w  | 5.67      | 190                        | 418                      | 503:       | —                   |
| 37210  | He-w  | —         | 280                        | 616                      | —          | —                   |
| 37479  | He-r  | 1.19      | 1900                       | 4180                     | 4312       | Glagolevskij (2019) |
| 37642  | He-w  | 1.08      | 1886                       | 4149                     | 2780:      | —                   |
| 37776  | He-r  | 1.54      | 820                        | 1804                     | 3760       | Glagolevskij (2019) |
| 47777  | He-r  | —         | 355                        | 781                      | —          | —                   |
| 49333  | He-w  | 2.18      | 640                        | 1408                     | —          | —                   |
| 51688  | He-w  | —         | 150                        | 330                      | —          | —                   |
| 49606  | He-w  | 3.35      | 400                        | 880                      | 1410       | Glagolevskij (2019) |
| 58260  | He-r  | 1.66      | 2220                       | 4884                     | 3063       | Glagolevskij (2019) |
| 60344  | He-r  | —         | 0                          | 0                        | —          | —                   |
| 64740  | He-r  | 1.33      | 551                        | 1213                     | 849        | Glagolevskij (2019) |
| 66522  | He-r  | —         | 591                        | 1300                     | —          | —                   |

Таблица 2. (Продолжение)

| Звезда | Тип  | $P$ , дни | $\langle B_e \rangle$ , Гс | $B_s(\langle B \rangle)$ | $B_s$ , Гс | Ref.                 |
|--------|------|-----------|----------------------------|--------------------------|------------|----------------------|
| (1)    | (2)  | (3)       | (4)                        | (5)                      | (6)        | (7)                  |
| 78316  | He-w | —         | 154                        | 339                      | 541        | Glagolevskij (2019)  |
| 79158  | He-w | 3.83      | 691                        | 1520                     | 1762       | Glagolevskij (2019)  |
| 93030  | He-r | —         | 0                          | 0                        | —          | —                    |
| 96446  | He-r | 0.85      | 1180                       | 2598                     | 955        | Glagolevskij (2019)  |
| 109026 | He-w | —         | 342                        | 752                      | —          | —                    |
| 116458 | He-w | 147.9     | 1917                       | 4217                     | 4676       | Glagolevskij (2013a) |
| 120640 | He-w | —         | 0                          | 0                        | —          | —                    |
| 120709 | He-w | —         | 135                        | 297                      | —          | —                    |
| 125823 | He-w | 8.82      | 333                        | 734                      | 390        | Glagolevskij (2019)  |
| 131120 | He-w | 1.57      | 0                          | 0                        | —          | —                    |
| 133518 | He-w | —         | 125                        | 275                      | —          | —                    |
| 137509 | He-w | 4.49      | 1047                       | 2303                     | 2967       | Glagolevskij (2013a) |
| 142301 | He-w | 1.46      | 2100                       | 4620                     | 6425       | Glagolevskij (2019)  |
| 142884 | He-w | 0.80      | 60                         | 132                      | —          | —                    |
| 142990 | He-w | 0.98      | 1370                       | 3014                     | —          | —                    |
| 143699 | He-w | —         | 90                         | 200                      | —          | —                    |
| 144334 | He-w | 1.49      | 783                        | 1722                     | —          | —                    |
| 144661 | He-w | —         | 303                        | 667                      | —          | —                    |
| 144844 | He-w | —         | 174                        | 383                      | —          | —                    |
| 145501 | He-w | 0.58      | 1387                       | 3051                     | —          | —                    |
| 146001 | He-w | 3.91      | 522                        | 1149                     | —          | —                    |
| 151346 | He-w | 2.18      | 0                          | 0                        | —          | —                    |
| 162374 | He-w | —         | 0                          | 0                        | —          | —                    |
| 168733 | He-w | —         | 750                        | 1650                     | —          | —                    |
| 175156 | He-r | —         | 70                         | 154                      | —          | —                    |
| 175362 | He-w | 3.67      | 3573                       | 7862                     | 12000      | Glagolevskij (2013a) |
| 177003 | He-r | —         | 160                        | 352                      | —          | —                    |
| 182255 | He-w | 1.26      | —                          | —                        | 100        | Glagolevskij (2019)  |
| 183339 | He-w | —         | 1510                       | 3322                     | —          | —                    |
| 184927 | He-r | 9.53      | 1302                       | 2865                     | 3265       | Glagolevskij (2019)  |
| 186205 | He-r | —         | 430                        | 946                      | —          | —                    |
| 202671 | He-w | —         | 351                        | 772                      | —          | —                    |
| 209339 | He-r | —         | 230                        | 506                      | —          | —                    |
| 217833 | He-w | 5.39      | 490                        | 1048                     | —          | —                    |
| 224926 | He-w | —         | 0                          | 0                        | —          | —                    |

### 3. СРЕДНЕЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ He-g- И He-w-ЗВЕЗД

В работе Glagolevskij (2019) приведены величины среднего поверхностного магнитного поля  $B_s$  для 26 звезд с гелиевыми аномалиями. Эти величины были определены по зеemannовскому расщеплению спектральных линий G.Mathys, а также нами, посредством моделирования магнитных структур (Glagolevskij 2014a). Эти данные приведены в предпоследнем столбце таблицы 1. Для увеличения надежности изучаемых зависимостей было решено увеличить количество оценок  $B_s$  путем моделирования по новым данным о  $B_s(\Phi)$  и средних квадратических величинах  $\langle B_e \rangle$  для ряда звезд. Таким путем мы пополнили список еще данными для 34 звезд. Несмотря на меньшую надежность определений  $B_s$  по  $\langle B_e \rangle$ , их относительно большое количество в некоторой степени компенсирует их недостаточную точность. В таблице 2 приведены номера звезд, тип пекулярности, относительные радиусы  $R/R_z$ , периоды вращения (собранные из разных источников Glagolevskij (2019)), средняя квадратическая величина магнитного поля  $\langle B_e \rangle$ , средняя поверхностная величина магнитного поля  $B_s$   $\langle B_e \rangle$ , оцененная по соответствующей зависимости (см. далее), затем средняя поверхностная величина магнитного поля  $B_s$ , оцененная по зеemannовскому расщеплению спектральных линий и по моделям магнитных структур (Glagolevskij 2019). Величины  $B_s$ , определенные из моделей по данным работы Vuchkov et al. (2005), отмечены двоеточием. Следует отметить, что для моделирования необходимо знание угла наклона звезды к лучу зрения, которое неизвестно только для шести звезд (HD 36313, 36526, 36668, 37041, 37151, 37642), поэтому для них принята вероятная средняя величина  $i = 60^\circ$ .

Среднеквадратические величины  $\langle B_e \rangle$  вычислены по формуле  $\langle B_e \rangle = [\Sigma(B_{ei}^2 - \sigma_i^2)/n]^{1/2}$  (Brown et al. 1981). Данные для их вычисления взяты из серии работ Borra (1975; 1981), Borra and Landstreet (1979), Brown et al. (1981), Conti (1970), Glagolevskii et al. (1990), Glagolevskij et al. (1986), Kemp and Wolstencroft (1973), Landstreet and Borra (1978), North (1984). Соотношение средних величин  $B_s$  и  $\langle B_e \rangle$  оказывается равным  $B_s = 2.2\langle B_e \rangle$ , с помощью которого были вычислены  $B_s(\langle B_e \rangle)$ . Доля таких звезд в таблице составляет 36%. Количество звезд He-g в таблице 1 составляет только 26% от общего количества (Glagolevskij 2013b), что пока еще мало для уверенных статистических исследований.

### 4. ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ $B_s$ CP-ЗВЕЗД НА ГП

Поведение магнитного поля CP-звезд при их эволюционном движении поперек полосы ГП мы обсуждали не раз, уточняя его по мере накопления и уточнения данных. Последний вариант средней зависимости для звезд всех типов пекулярности  $B_s(R/R_z)$ , получен в работе Osmer and Peterson (1974), она представлена на рис. 9а. Эта зависимость является одной из важнейших в эволюции магнитных звезд. Сплошными линиями показаны средние зависимости изменения магнитного поля вследствие изменения радиуса звезд. Поскольку было слишком мало данных для звезд He-g и He-w, то фактически зависимость соответствует в основном звездам Si+SrCrEu-типа. Вертикальные линии на  $R/R_z = 1.75$  и  $2.2$  показывают область, в которой происходит изменение внутренней структуры звезд. Расчет, сделанный на основании эволюционных треков (Ekström et al. 2012) (рис. 10), показывает, что у гелиевых звезд температура между точками  $R/R_z = 1.75$  и  $2.2$  изменяется на величину  $\Delta T_{\text{эфф}} \sim 1500$  К, а радиус увеличивается примерно на 40%. Граница  $R/R_z \approx 1.75$  — это точка возврата звезды, а момент начала перестройки приходится на  $R/R_z \approx 2.2$ . Между этими границами происходит накопление звезд, поэтому на зависимости  $N(R/R_z)$  в этом промежутке наблюдается максимум, хорошо заметный на рис. 12, построенном для кремниевых звезд. У звезд разных температур этот максимум несколько смещается, ширина области  $R/R_z$  тоже разная. После ZAMS поле растет вследствие релаксации мелкомасштабной фракции и исчезновения экранирующей нестационарной оболочки. После максимума поле уменьшается вследствие эволюционного увеличения радиуса. В пределах  $R/R_z \approx 1.75-2.2$  звезда испытывает внутреннюю перестройку, радиус уменьшается, величина  $B_s$  увеличивается. После перестройки звезд, структуры центрального диполя у них сохраняются. К таким звездам можно отнести HD 5737, 51418, 58260, 74521, 148199 (Glagolevskij 2019).

Смещение зависимости  $B_s(R/R_z)$  вверх в промежутке  $R/R_z = 1.75-2.2$  на рис. 9а происходит вследствие уменьшения радиуса в момент перестройки и увеличения магнитного поля вследствие этого. Поле увеличивается в 1.25 раз. Для объяснения величины смещения необходимо уменьшить радиус звезды тоже примерно во столько же раз. Радиус у звезд между моментами  $R/R_z = 1.75$  и  $2.2$  увеличивается в 1.3 раза (рис. 10). Таким образом, скачек магнитного поля на рис. 9а вполне объясним.

В данной работе сделана попытка рассмотреть изменение поля  $B_s$  по мере эволюции поперек полосы ГП для звезд He-g+He-w-группы с

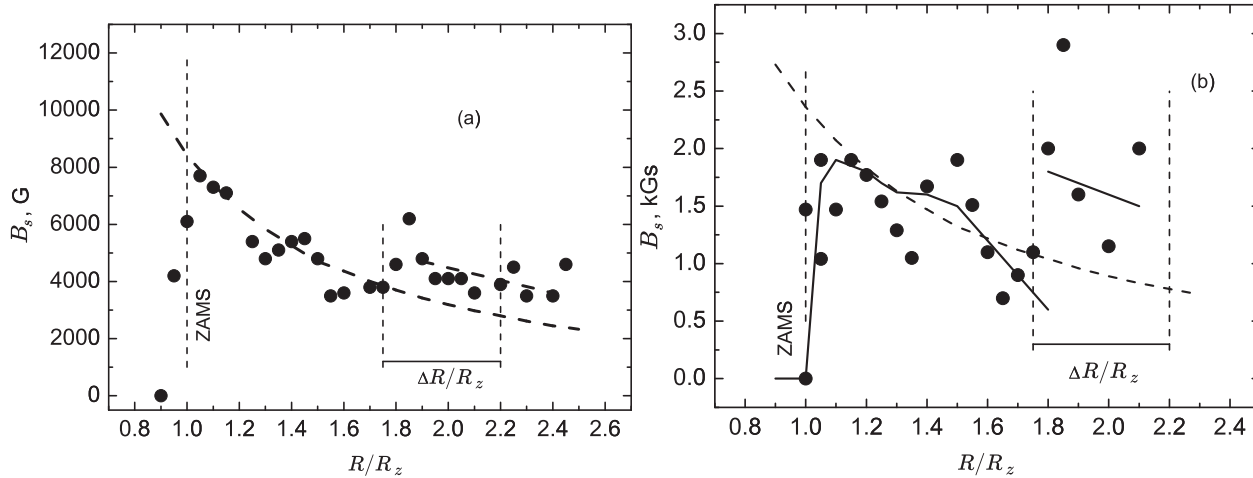


Рис. 9. Изменение среднего поверхностного магнитного поля  $B_s$  при эволюционном движении звезд поперек полосы Главной последовательности: а) Si+SrCrEu-звезды, б) He-g+He-w-звезды.

использованием данных из таблицы 1 (рис. 9б). На рассматриваемую зависимость оказывают наибольшее влияние данные для He-w-звезд, доля которых равна 74%. Так же, как и рис. 9а, эта зависимость построена методом скользящего среднего (сплошные кривые нанесены вручную). В общих чертах обе зависимости мало различаются. По-прежнему наблюдается быстрый рост  $B_s$  после ZAMS, максимум на  $R/R_z \approx 1.2$  и, затем, падение до  $R/R_z \approx 1.75$ . В этот момент происходит внутренняя перестройка звезды, ее радиус уменьшается, а величина поля, вследствие этого, увеличивается почти в 2 раза (см. (Glagolevskij 2019) и рис. 9б)! Это значит, что для получения такого скачка магнитного поля нужно, чтобы радиус тоже уменьшился примерно в 2 раза (см. раздел 4). Но в соответствии с рис. 4а это изменение больше. На зависимости рис. 9б штриховая линия взята из предыдущего рис. 9а, она представляет собой степенную функцию (примерно в степени 1.5). Изменение происходит за счет эволюционного увеличения радиуса. Рост поля после ZAMS возникает вследствие релаксации запутанного магнитного начального поля в простую полоидальную структуру, а также вследствие исчезновения неустойчивости верхних слоев атмосферы после прекращения аккреции (Glagolevskij 2016).

Для гелиевых звезд из-за большого разброса точек на рис. 9б мы не можем получить достаточно надежную зависимость изменения поля за счет увеличения радиуса, но если предположить, что она такая же, как на рис. 9а, то получаем изменение  $B_s$  у гелиевых звезд без влияния «эффекта радиуса», представленное на рис. 11. Как и у звезд других типов пекулярности магнитное поле после ZAMS растет, затем наступает горизонтальная часть, а на  $R/R_z = 1.75$  происходит скачек  $B_s$ .

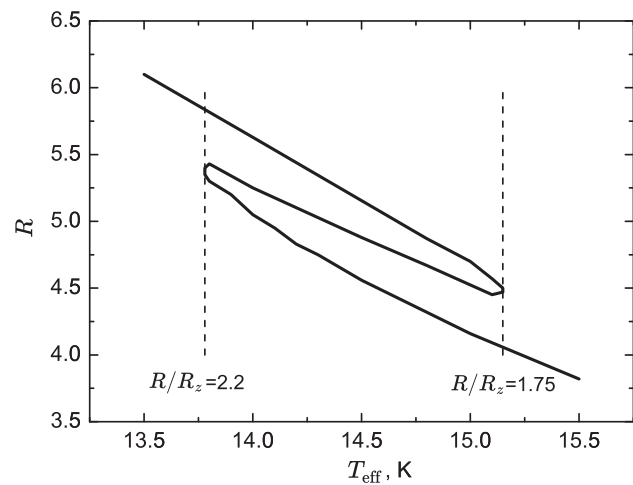
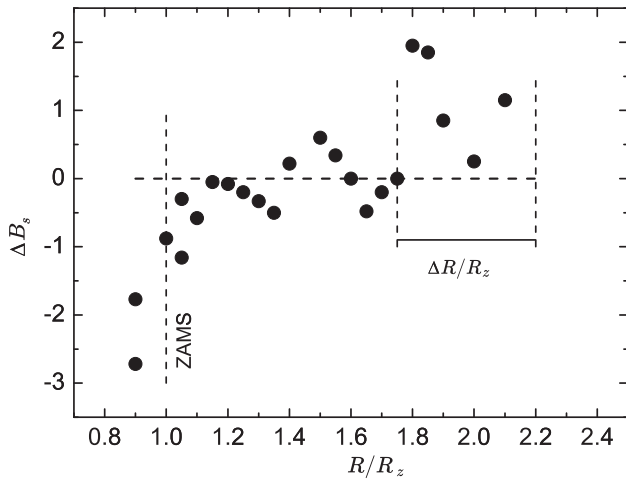


Рис. 10. Эволюционный трек гелиевых магнитных звезд.

## 5. ИЗМЕНЕНИЕ $v \sin i$ НА ГП

Величина скачка поля  $B_s$  на рис. 9б и рис. 11 кажется слишком большой. Ее невозможно отнести за счет расчетного уменьшения радиуса звезды (рис. 10). Если предположить, что поле меняется в степени 1.5 от радиуса, то это значит, что радиус уменьшился в 3–3.5 раза, а не на 30%, как сказано выше. Таким образом, рис. 9б и рис. 11 оказываются необъяснимыми.

Вертикальными линиями на рис. 4а обозначены пределы, в которых траектория звезды описывает «петлю» на эволюционном треке. В момент  $R/R_z > 1.75$  величина  $v \sin i$  уменьшается в 3–3.5 раза! Это означает, что радиус уменьшился во столько же раз, что сомнительно. Выше мы показали, что в соответствии с рис. 10 радиус изменяется на величину порядка 30%. Из рассмотрения рис. 9б



**Рис. 11.** Изменение среднего поверхностного магнитного поля гелиевых звезд после исключения влияния эволюционного роста радиуса звезд.

получается, что магнитное поле на  $R/R_z > 1.75$  тоже увеличивается в два раза. Таким образом, делаем заключение, что аномальное уменьшение  $v \sin i$  сопровождается аномальным скачком магнитного поля, подтверждая его реальность. Эту проблему следует рассмотреть специально после привлечения дополнительных данных.

Попутно заметим, что когда магнитные звезды приходят на ZAMS, они уже имеют малые скорости вращения. Это видно из рис. 4а, где на ZAMS у гелиевых звезд  $v \sin i \approx 60\text{--}80 \text{ км с}^{-1}$ , что много меньше, чем у нормальных. Кремниевые звезды на ZAMS имеют скорости  $v \sin i = 40\text{--}50 \text{ км с}^{-1}$  (рис. 4б) (разброс точек большой, потому что влияет эффект наклона звезд к лучу зрения). Анализ последних наблюдательных данных показывает, что потеря момента вращения произошла вероятнее всего на стадии гравитационного коллапса (Glagolevskij 2018a; b) путем магнитного торможения (Mouschovias and Paleologou 1979).

## 6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕЛИЕВЫХ ЗВЕЗД ПОПЕРЕК ПОЛОСЫ ГП

Следующий важный для теории вопрос касается характера распределения  $N(R/R_z)$  гелиевых звезд поперек полосы ГП, представленного на рис. 1. Оно похоже на распределение  $B_s(R/R_z)$  на рис. 9. В работе Glagolevskij (2016) мы пытались объяснить причину подобия следующим образом. Вблизи ZAMS магнитное поле почти нулевое. Вследствие зависимости химических аномалий от магнитного поля (Glagolevskij 1994) содержание химических элементов в этот момент нормальное, критерии отбора CP-звезд соответствуют нормальным звездам. По мере роста поля увеличиваются аномалии химического состава, критерии усиливаются,

в результате количество CP-звезд  $N$  тоже увеличивается. На эту зависимость накладывается другая, а именно: уменьшение  $N$  после максимума вследствие ослабления критерия отбора из-за уменьшения магнитного поля, а также увеличения скорости эволюции поперек полосы ГП. В период  $R/R_z \approx 1.75\text{--}2.0$  наступает внутренняя перестройка звезды, радиус уменьшается (рис. 4), поле увеличивается (рис. 9). В этот период происходит накопление числа звезд. Но рост  $N$  на рис. 1 мало заметен по сравнению со звездами других типов пекулярности, возможно, из-за малой статистики. Для сравнения на рис. 11 приводим такую же зависимость для Si-звезд, где максимум лучше заметен вследствие большого количества данных.

## 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ ВРАЩЕНИЯ $\lg P(B_s)$

В данной работе для гелиевых звезд мы используем больше данных о величинах магнитного поля, чем раньше, поэтому имеет смысл повторить исследование этой зависимости. Распределение  $\lg P(B_s)$  для звезд He-g+He-w представлено на рис. 6а. В течение длительного времени исследователи пытались найти связь между величиной магнитного поля и скоростью вращения, предполагая, что потеря момента вращения вызывается магнитным торможением, а также пытались найти признаки действия динамо механизма. В работе Glagolevskij (2017) такие зависимости были исследованы отдельно для четырех групп звезд: He-g, He-w, Si и SrCrEu. Эти зависимости оказались сложно интерпретировать, потому что на них влияет не только величина поля, но и масса звезды (протозвезды) (раздел 7) и длительность эволюции, т.е. возраст (раздел 8). Кроме того, влияние на разброс точек оказывает большой диапазон периодов вращения — приблизительно от  $1^d$  до  $30\,000^d$ . Тем не менее, средняя величина магнитного поля звезд с аномальными линиями гелия оказалась равной  $B_s = 1.87 \text{ кГс}$  (60 звезд), а для Si+SrCrEu-группы  $B_s = 5 \text{ кГс}$  (150 звезд (Glagolevskij 2016, Landstreet 1970)). Первая оценка несколько отличается от нашей ранней величины  $B_s = 2.5 \text{ кГс}$  (Glagolevskij 2016). Таким образом, среднее поле звезд типа He-g+He-w более чем в два раза меньше, чем у звезд Si+SrCrEu-типа. Соответственно различаются и максимальные периоды вращения. Различие по магнитному полю мы объясняем тем, что гелиевые протозвезды имеют больше радиус, а также потому, что длительность их эволюции меньше, поэтому релаксация магнитного поля у них произошла в меньшей степени.

Стрелки на рис. 6а показывают направление потери момента вращения родительскими протозвездами. Они проведены через максимум распределения. Видно, что звезды слева от вертикальной

линии подчиняются зависимости — период вращения пропорционален величине магнитного поля. Справа эта зависимость нарушается, и чем сильнее поле, тем слабее потеря момента вращения. Наиболее эффективно момент вращения в стадии магнитных протозвезд теряется при некоторых средних величинах, которые у звезд ГП становятся как  $B_s = 3$  кГс для He-g+He-w- и 6.5 кГс для Si+SrCrEu-звезд. Будущей задачей, после пополнения новыми данными, является такое же исследование звезд He-g и He-w отдельно. Большой разброс точек справа определяется малой статистикой и наличием отдельных звезд с очень большим полем. Эти данные важны для усовершенствования теории магнитного торможения (Mouschovias and Paleologou 1979). Данные зависимости публикуются впервые.

### 8. ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРИОДОВ ВРАЩЕНИЯ ОТ МАССЫ ЗВЕЗДЫ

Эта зависимость показывает, что степень потери момента вращения магнитных протозвездных облаков, рассмотренной в работе Glagolevskij (2016), зависит от массы. Это видно из того, что He-g+He-w, Si и SrCrEu-звезды, имеют массы в пределах  $M = 3-10M_\odot$ ,  $2-5M_\odot$  и  $1.5-3M_\odot$ , в то же время обладают соответственно максимальными периодами вращения  $P(\max) \approx 20, 2555$  и  $30\,000$  дней. Значит степень потери момента вращения протозвезды обратно пропорциональна массе. В разделе 6 мы показали, что величина  $P(\max)$  пропорциональна величине среднего магнитного поля, а также среднему возрасту (т.е. длительности эволюции в процессе потери момента вращения). Эти данные следует учитывать при усовершенствовании теории магнитного торможения.

### 9. ИЗМЕНЕНИЕ ПЕРИОДА ВРАЩЕНИЯ НА ГП

Для He-g+He-w-звезд методом скользящего среднего на рис. 5a по данным из Glagolevskij (2019) построена зависимость  $P(R/R_z)$ . К сожалению, среди гелиевых звезд практически нет объектов в области  $R/R_z > 1.75$ , поэтому свойства этого диапазона мы изучаем на примере рис. 5b для Si-объектов. Зависимости показывают медленный рост периода вращения по мере эволюционного движения звезд поперек полосы ГП, происходящий вследствие увеличения радиуса. Вертикальными линиями ограничен период внутренней перестройки звезд, когда радиус уменьшается (рис. 4a). Данных в диапазоне  $R/R_z > 1.75$  мало, тем не менее, учитывая рис. 5b, есть основания предполагать, что в промежутке  $R/R_z \approx 1.75-2.2$  происходит некоторое увеличение  $P$ .

Важный момент состоит в том, что из представленных зависимостей получается, что нарушается требование сохранения момента вращения при эволюционном движении звезд поперек полосы ГП. В диапазоне от ZAMS до  $R/R_z = 1.75$  радиус увеличивается в 1.75 раз у звезд обоих типов пекулярности, а период вращения увеличивается почти в 3.5 раза в обоих случаях. Таким образом, существует механизм дополнительной потери момента вращения на ГП. Проблема такого несоответствия требует своего разрешения, особенно в связи с тем, что имеются убедительные свидетельства в пользу твердотельного вращения магнитных звезд (Glagolevskij 2019). Необходимо привлечение дополнительных наблюдательных данных для решения этой проблемы.

### 10. ЗАВИСИМОСТЬ He/H ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ У ЗВЕЗД He-g

Как мы видели выше (1979), величина  $R$ -индекса зависит от величины магнитного поля. В ряде работ мы уже изучали зависимость содержания гелия и других химических элементов от магнитного поля (Bychkov et al. 2009, Glagolevskii et al. 1990, Glagolevskij 1988; 1996; 1998; 2007, Glagolevskij and Chunakova 1985, Glagolevskij and Kopylova 1990; 1991, Glagolevskij et al. 2007a; b; 2006b; 1992, Leushin et al. 2000, Zboril et al. 1994; 1997). Данные из этих работ приведены в таблице 3. На их основании и данных из таблицы 1 способом скользящего среднего построена зависимость  $(\text{He}/\text{H})B_s$ , представленная на рис. 13. Несмотря на большой разброс точек, хорошо заметен рост содержания гелия с увеличением магнитного поля. Сплошная кривая — это полином второй степени, постороенный методом наименьших квадратов. Очевидно, что при  $B_s = 0$  на ZAMS, содержание гелия нормальное. После появления и затем увеличения полоидального магнитного поля величина He/H растет вплоть до  $B_s \approx 3-4$  кГс, после чего рост He/H прекращается вследствие полного подавления микротурбуленции (Glagolevskij 1994). Такая же зависимость наблюдается и для других химических элементов (Glagolevskij 2007). В работах Michaud et al. (1987), Vauclair (1975) предложен механизм обогащения гелием верхних слоев атмосфер звезд типа He-g. Оно происходит путем диффузии гелия под действием потери массы, вызванной радиационным давлением. Скорость диффузии зависит от коэффициента диффузии, зависящего от скорости нетепловых движений газа и температуры. Магнитное поле подавляет такие движения, отчего увеличивается скорость диффузии и возникает зависимость избытка содержания гелия от магнитного поля. У звезд с меньшей

Таблица 3. Среднее содержание He/H у звезд He-r

| Звезда   | Сред He/H | Звезда   | Сред He/H |
|----------|-----------|----------|-----------|
| 35708    | 0.12      | 125823   | 0.06      |
| 35912    | 0.18      | 133518   | 0.23      |
| 36430    | 0.17      | 142990   | 0.19      |
| 36485    | 0.14      | 144218   | 0.10      |
| 36982    | 0.13      | 149257   | 0.24      |
| 37017    | 0.27      | 149363   | 0.25      |
| 37479    | 0.36      | 164769   | 0.41      |
| 37776    | 0.36      | 168785   | 0.41      |
| 264111   | 0.20      | 169467   | 0.19      |
| 273748   | 0.13      | 175191   | 0.90      |
| 47777    | 0.10      | 177003   | 0.10      |
| 57219    | 0.17      | 184927   | 0.26      |
| 58260    | 0.45      | 186205   | 0.41      |
| 60344    | 0.24      | 193924   | 0.11      |
| 64740    | 0.25      | 208266   | 0.16      |
| 68450    | 0.39      | 209339   | 0.25      |
| 66522    | 0.28      | 260858   | 0.36      |
| 92938    | 0.17      | -46°3093 | 0.21      |
| 96446    | 0.37      | -46°4639 | 0.13      |
| -62°2124 | 0.81      | -69°2698 | 0.33      |
| 108483   | 0.12      | -13°4383 | 0.14      |
| 120640   | 0.08      | -43°4300 | 0.28      |

массой ветер слабый и гелий тонет под действием гравитации, формируя звезды типа He-w.

### 11. ИЗМЕНЕНИЕ $\text{He}/\text{H}(R/R_z)$ У ЗВЕЗД He-r

В работах Glagolevskij (1998; 2017), Glagolevskij et al. (1992), Leushin et al. (2000), Zboril et al. (1994) мы уже рассматривали это свойство. Там было показано, что содержание He/H нормальное на ZAMS, затем оно увеличивается до  $R/R_z = 1.75$ , после чего оно до некоторой степени уменьшается. Зависимость прерывается на  $R/R_z = 2$ . Гелий скапливается в атмосфере под действием давления радиации и ветра (Vauclair 1975), который усиливается по мере увеличения радиуса. В момент  $R/R_z = 2$ , вероятно, He начинает «выметаться»

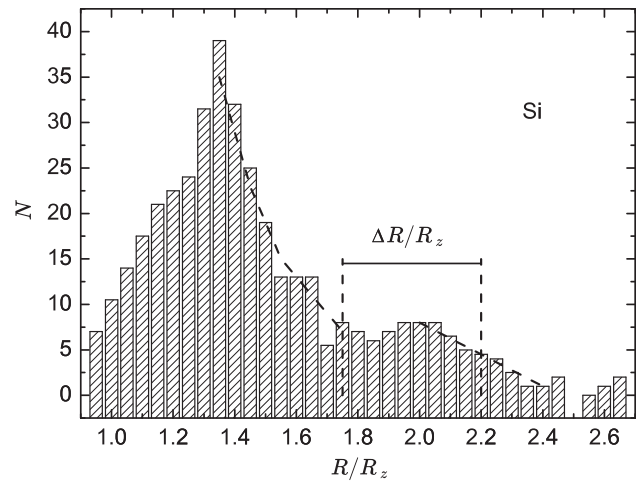


Рис. 12. Распределение Si-звезд поперек полосы Главной последовательности.

вследствие усиления ветра (Glagolevskii et al. 1990), и он исчезает полностью.

С использованием дополнительных данных мы попытались уточнить этот результат построив новую зависимость изменения величин  $\text{He}/\text{H}(R/R_z)$ . При этом мы дали вдвое меньше вес звездам, для которых только одно определение величины He/H. Зависимость, полученная методом скользящего среднего, приведена на рис. 14. Хорошо видно, что на ZAMS содержание гелия нормальное, но по мере эволюционного движения звезды поперек полосы ГП оно растет, достигает максимума и потом начинает падать, в соответствии с ходом магнитного поля. При достижении периода  $R/R_z = 1.75-2.2$  звезда претерпевает перестройку, радиус уменьшается (рис. 4а), магнитное поле увеличивается (рис. 9б), вследствие этого содержание растет. Поле выросло примерно в два раза, содержание гелия приблизительно в 1.5 раза. Таким образом, полученная зависимость несколько отличается от той, которая описана в первом абзаце. Очевидно, что пока это ориентировочные оценки.

Естественно, что зависимости  $\text{He}/\text{H}(R/R_z)$  и  $B_s(R/R_z)$ , похожи друг на друга, потому что содержание гелия зависит от магнитного поля (рис. 13). Если мы построим зависимость  $\text{He}/\text{H}(R/R_z)$  с использованием зависимостей  $\text{He}/\text{H}(B_s)$  на рис. 13 и  $B_s(R/R_z)$  на рис. 9б, то получим кривую А, показанную на рис. 14, форма которой принципиально не отличается от наблюдаемой. Этот пример показывает на согласованность изучаемых зависимостей.



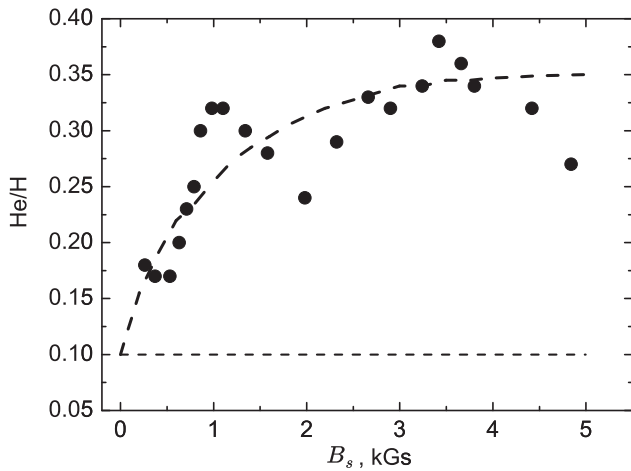


Рис. 13. Зависимость содержания гелия от величины магнитного поля.

## 12. ЗАВИСИМОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ ОТ $B_s$ ДЛЯ ЗВЕЗД He-w

Диффузия гелия вглубь у звезд He-w происходит под действием гравитации. Как говорилось выше, чем сильнее магнитное поле, тем сильнее подавляется микротурбулентция. В результате диффузия химических элементов вглубь усиливается (Glagolevskij 2007, Glagolevskij et al. 2004), приводя к дефициту гелия. График зависимости содержания гелия от магнитного поля приведен на рис. 15, построенном методом скользящего среднего. Он коренным образом отличается от аналогичного графика для звезд He-g. При росте поля  $B_s$  от 0 до 1.5 кГс действительно намечается некоторое уменьшение содержания. После этого содержание начинает стремиться к нормальной величине, несмотря на дальнейшее подавление микротурбулентции. Рост величины He/H после  $R/R_z \approx 1.2$  на рис. 15 означает уменьшение роли гравитации и усиление роли ветра. После полного подавления турбулентции, наступающего при  $B_s = 3-4$  кГс (Glagolevskij 2007) (см. рис. 13 для звезд He-g), содержание должно было бы оставаться постоянным, но, к сожалению, данных нет. Можно предположить, что одновременно с ростом поля растет ветер (Groote et al. 1980, Groote and Kaufmann 1981), который начинает все сильнее выдавливать гелий к поверхности, увеличивая He/H в сторону нормальной содержания. При очень сильном поле звезда теряет признаки He-w. Значит ли это, что могут существовать звезды с сильным полем, но с нормальными He/H признаками?

## 13. ИЗМЕНЕНИЕ $\text{He}/\text{H}(R/R_z)$ У ЗВЕЗД He-w

По данным таблицы 4, (собранным из работ Glagolevskij and Kopylova (1990), Glagolevskij et al.

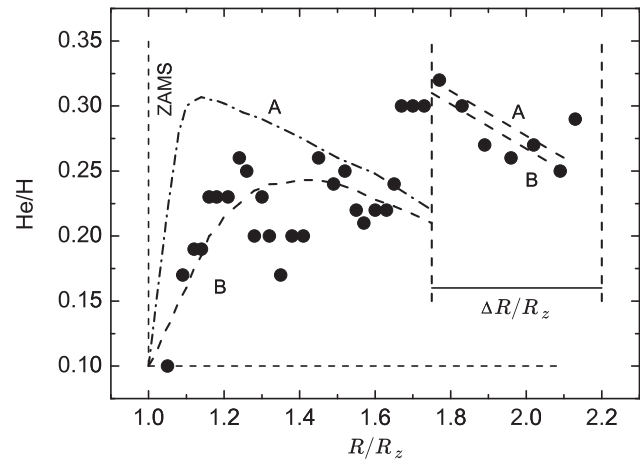


Рис. 14. Изменение содержания гелия при эволюционном движении He-g-звезд поперек полосы Главной последовательности. А — вычисленная зависимость при предположении влияния только ветра, В — наблюдаемая зависимость.

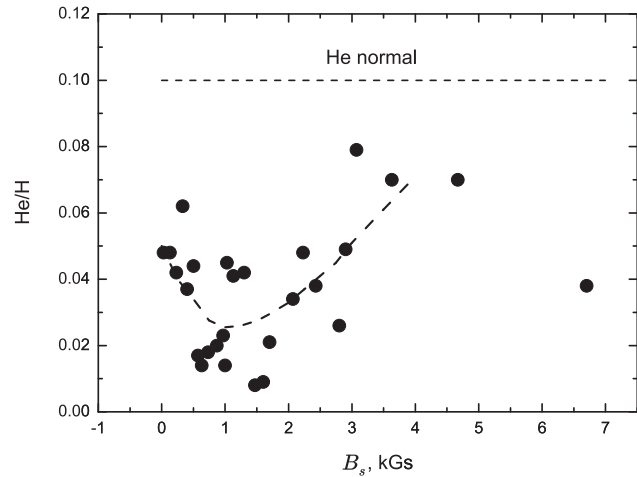
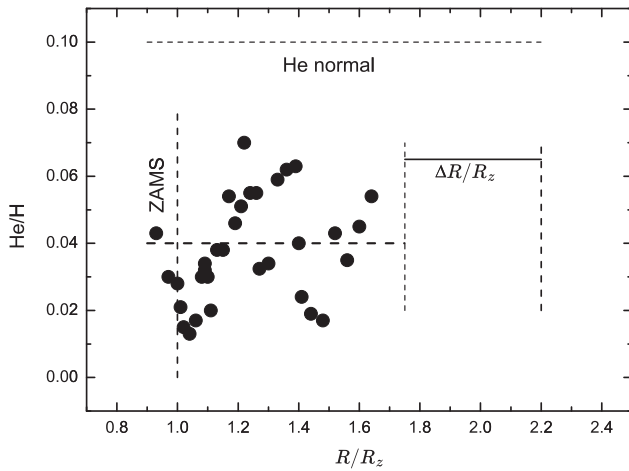


Рис. 15. Зависимость содержания гелия от величины среднего поверхностного магнитного поля у звезд He-g+He-w.

(2007b; 2006b) и таблицы 1) построена зависимость  $\text{He}/\text{H}(R/R_z)$  методом скользящего среднего, представленная на рис. 16. Хорошо видно, что звезды приходят на ZAMS уже со слабыми линиями гелия, т.е. условия для гравитационного погружения гелия вглубь (Alecian and Vauclair 1981, Michaud et al. 1987) были уже в стадии HАеВе. В фазе  $R/R_z \approx 1.2$  магнитное поле максимально, поэтому в этот момент должно происходить максимальное подавление турбулентции и наилучшие условия для диффузии гелия внутрь звезды. В этот момент величина He/H должна была бы быть минимальной, но этого не заметно. По-видимому, реальная зависимость на рис. 16 практически постоянна и лишком большой разброс точек. Для



**Рис. 16.** Изменение содержания гелия при эволюционном движении He-w-звезд поперек полосы Главной последовательности.

уточнения ситуации необходимы дополнительные наблюдения. Отсутствие звезд на  $R/R_z > 1.75$ , вероятно, связано с недостаточным количеством данных.

#### 14. ОРИЕНТАЦИЯ ДИПОЛЕЙ

Проблема ориентации магнитных полей в магнитных звездах имеет принципиальное значение, потому что это свойство непосредственно связано с механизмом потери момента вращения и формирования магнитных звезд (Mouschovias and Paleologou 1979). Гелиевые магнитные звезды, как и звезды всех других типов пекулярности, имеют преимущественное направление магнитных полей вдоль экватора под малым углом  $\alpha = 0-20^\circ$  (рис. 8a,b). Среди гелиевых объектов в этом диапазоне в примерно в семь раз больше звезд, чем в диапазоне  $\alpha = 20-90^\circ$  (Glagolevskij 2018a). Среди звезд Si+SrCrEu-типов это соотношение равно примерно 1.5. Последнее утверждение хорошо заметно на рис. 17a,b Glagolevskij (2016), где показаны распределения углов  $\alpha$  у гелиевых и Si+SrCrEu-звезд (эти соотношения только приблизительные вследствие малого количества данных для He-g звезд). Из результатов приведенного выше обзора мы видим, что эффективность торможения протозвездного облака обратно пропорциональна массе, пропорциональна величине магнитного поля и времени торможения. Большая масса, относительно слабое среднее поле и короткое время торможения гелиевых протозвезд приводят к тому, что эффективное торможение испытывают только те протозвезды, для которых условие ориентации  $\alpha = 0^\circ$  выполняется более жестко (Landstreet et al. 1975). Если в звездах имеются даже ничтожные движения вещества, то они у

**Таблица 4.** Среднее содержание He/H у звезд He-w

| Звезда | He/H  | Звезда | He/H  |
|--------|-------|--------|-------|
| 5737   | 0.268 | 49606  | 0.081 |
| 11857  | 0.066 | 51688  | 0.005 |
| 21699  | 0.007 | 79158  | .052  |
| 22920  | 0.016 | 120709 | 0.093 |
| 23408  | 0.277 | 125823 | 0.089 |
| 28843  | 0.006 | 142096 | 0.178 |
| 35298  | 0.014 | 142301 | 0.012 |
| 35456  | 0.008 | 142823 | 0.089 |
| 36497  | 0.240 | 142884 | 0.021 |
| 35502  | 0.064 | 142990 | 0.118 |
| 35730  | 0.154 | 144334 | 0.004 |
| 36046  | 0.059 | 144661 | 0.008 |
| 36429  | 0.039 | 145501 | 0.012 |
| 36540  | 0.011 | 146001 | 0.109 |
| 36549  | 0.034 | 151346 | 0.013 |
| 36629  | 0.090 | 161480 | 0.166 |
| 36668  | 0.014 | 176582 | 0.031 |
| 36916  | 0.002 | 182568 | 0.073 |
| 37058  | 0.051 | 183339 | 0.107 |
| 37129  | 0.111 | 191980 | 0.777 |
| 37140  | 0.017 | 200311 | 0.022 |
| 37210  | 0.028 | 212454 | 0.053 |
| 37642  | 0.016 | 212986 | 0.063 |
| 37807  | 0.181 | 217833 | 0.004 |
| 44253  | 0.039 | 224926 | 0.056 |
| 49333  | 0.028 |        |       |

долго живущих Si+SrCrEu-звезд смогут увеличить число звезд с большими величинами  $\alpha$ . У гелиевых звезд, вследствие их короткого времени жизни, такое изменение не успевает произойти. Для объяснения наблюдаемого избытка звезд с  $\alpha = 0-20^\circ$  необходимо, чтобы отсутствовали крупномасштабные перемещения вещества. Это поддерживает гипотезу твердотельности вращения магнитных звезд (Glagolevskij 2018a; b). Не исключено, что этому способствует вмороженность магнитного поля. На основании данных в работе Glagolevskij (2016)

**Таблица 5.** Доля звезд с разной структурой

| Тип       | Центр.<br>диполь | Смещ.<br>диполь | Два<br>диполя | Три<br>диполя |
|-----------|------------------|-----------------|---------------|---------------|
| Si+SrCrEu | 34%              | 45%             | 17%           | 3%            |
| He-r+He-w | 36               | 36              | 23            | 5             |

можно получить представление о типичных структурах магнитных полей гелиевых и звезд других типов. В таблице 5 показаны доли разных структур у быстро и медленно эволюционирующих звезд. Они совершенно одинаковые, что является признаком того, что механизм формирования магнитных звезд во всем диапазоне масс одинаковый.

### 15. ПОТЕРЯ МОМЕНТА ВРАЩЕНИЯ

Эту проблему мы рассматривали в работах Glagolevskij (2018a; b), где по пунктам перечисляются доводы в пользу предположения о потере момента вращения магнитными протозвездами в стадии гравитационного коллапса. Поэтому отметим только основные доводы в пользу этой гипотезы. Механизм Mouschovias–Paleologou (Mouschovias and Paleologou 1979) естественно объясняет возможность магнитной потери момента вращения, объясняет преимущественную ориентацию магнитных полей и малую 10% долю магнитных звезд. Потеря момента вращения именно на ранних фазах эволюции объясняет малую долю тесных двойных систем, а также отделение магнитных звезд от нормальных объектов без поля на границе  $P \approx 1^d$ . В фазе HАеВе процесс потери момента вращения невозможен вследствие слабого, запутанного в фазе Хаяши магнитного поля у них. Потеря момента вращения на Главной последовательности не поддерживается наблюдательными данными, хотя небольшое увеличение периода вращения происходит вследствие эволюционного роста радиуса (рис. 5). Магнитные звезды всех типов пекулярности при выходе на ZAMS уже имеют характерные малые скорости вращения. Сложные структуры магнитных полей возникают вследствие коллапса сложных структур родительских магнитных протозвезд. Не предложены механизмы, которые могли бы создать наблюдаемые структуры в нестационарной фазе Хаяши или в фазе лучистых HАеВе-звезд. Если данный сценарий правильный, то можно утверждать, что нестационарная фаза не столь активна, чтобы полностью исказить реликтовое поле и его структуру. Из обсуждаемых выше свойств магнитных звезд всех типов пекулярности можно сделать вывод об одинаковых условиях их происхождения и эволюции.

### 16. ГРАНИЦА РАЗДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ И НЕ МАГНИТНЫХ CP-ЗВЕЗД

Эта проблема исследована в Glagolevskij (2018b), где показано, что звезды всех типов пекулярности, в том числе немагнитных, подчиняются зависимости — чем меньше скорость вращения  $v \sin i$ , тем больше их доля среди нормальных звезд. Для гелиевых звезд такая зависимость показана на рис. 7а, для нормальных на рис. 7б, из которых видно сильное отличие распределения гелиевых звезд от нормальных. Зависимости исследованы также в работе Glagolevskij (2017), где сделан вывод, что медленное вращение является единственным условием формирования магнитных и не магнитных химически пекулярных звезд. При угловой скорости вращения родительской протозвезды больше критической в ней возникает дифференциальное вращение (в центре угловая скорость больше), закручивающее магнитное поле в невидимую тороидальную форму. По величине  $v \sin i$  она приходится примерно на  $v \sin i \approx 25 \text{ км с}^{-1}$ . Зависимость на рис. 7 а искажена эффектом угла наклона  $i$ . Звезды, направленные к нам полюсом вращения, попадают в область  $v \sin i \approx 0 \text{ км с}^{-1}$ , направленные перпендикулярно — в область  $v \sin i \approx 100\text{--}250 \text{ км с}^{-1}$ . Максимум распределения гелиевых звезд приходится на  $v \sin i \approx 40 \text{ км с}^{-1}$ , а максимум такого же распределения нормальных звезд на  $v \sin i \approx 125 \text{ км с}^{-1}$ . Как показывают исследования Glagolevskij (2018b) формы рассматриваемых зависимостей для магнитных и немагнитных CP-звезд одинаковы, поэтому был сделан вывод, что магнитное поле не участвует в отделении их от нормальных. Единственный разделяющий фактор это скорость вращения.

На рис. 18 приведена зависимость числа звезд от периода вращения  $P$  для объектов He-r+He-w и Si+SrCrEu-типа. На рис. 18 видно, что зависимость для гелиевых звезд обрывается на  $P \approx 1^d$ , а для SrCrEu-объектов на  $P \approx 1^d 5$ . Это означает, что дифференциальное вращение у мало массивных звезд возникает при меньших угловых скоростях. Приведенные зависимости более определенно указывают положение границ разделения магнитных и не магнитных звезд.

### 17. ВЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ЯДРА НА ВНУТРЕННЮЮ СТРУКТУРУ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В работе Glagolevskij and Nazarenko (2018) мы обсуждали взаимодействие конвективного ядра с глобальным магнитным полем звезд. Эта проблема особенно интересна в случае гелиевых звезд, у которых размер конвективного ядра максимальный. В момент  $t = 0$  эволюции формируется лучистая

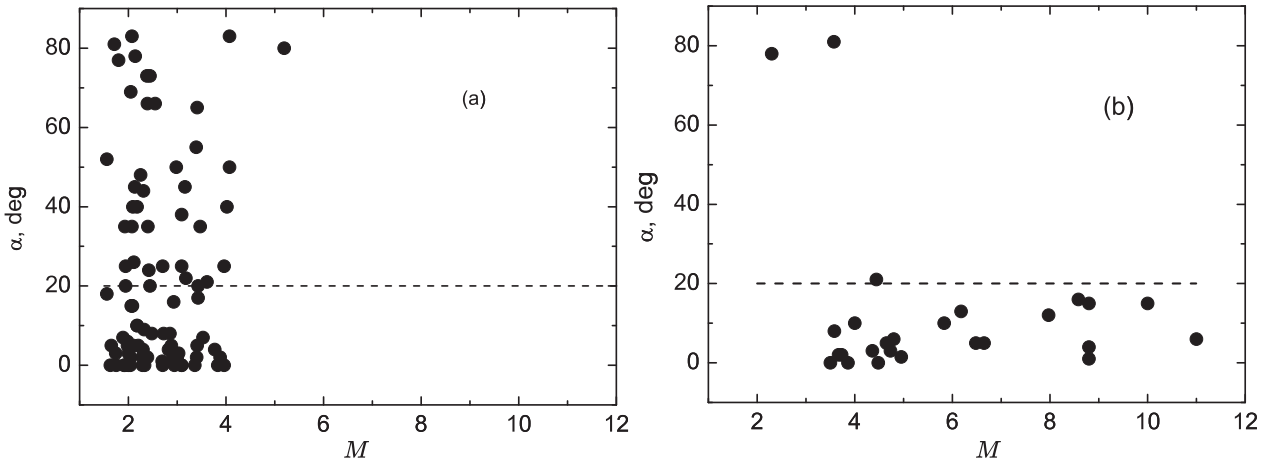


Рис. 17. Зависимость угла наклона  $\alpha$  магнитных диполей к плоскости экватора. а) Si+SrCrEu-звезды, б) He-r+He-w-звезды.

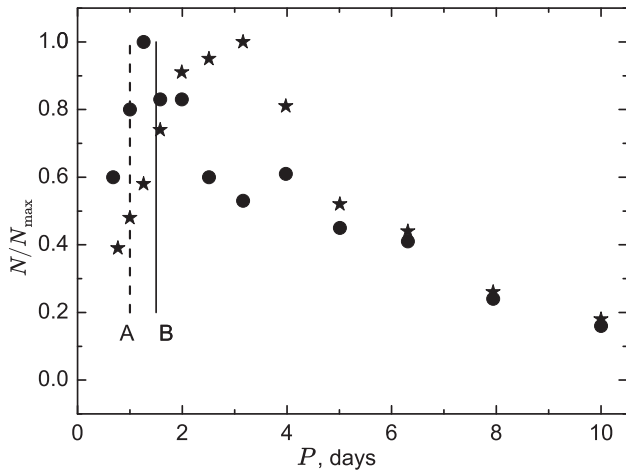


Рис. 18. Распределение звезд по периодам вращения  $P$ . Кружки — гелиевые звезды, звездочки — Si+SrCrEu-звезды. А — граница гелиевых звезд, В — граница Si+SrCrEu-звезд.

протозвезда и в ней возникает конвективное ядро. Магнитное поле звезды состоит из глобальной полоидальной и мелкомасштабной фракций. Конвективные движения запутывают и частично уничтожают магнитное поле внутри ядра, но полоидальная составляющая в остальном объеме звезды сохраняет свои силовые линии, которые обходят конвективное ядро. Вблизи поверхности ядра в магнитных звездах возникает концентрация силовых линий, в результате чего поле здесь усиливается. Пока неясно, каковы физические условия оказываются в этой области. По-видимому, конвективное ядро вращается с такой же угловой скоростью, с какой вся звезда. В работе Osmer and Peterson (1974) показано — магнитные звезды вращаются твердотельно. Если ядро вращается медленнее или быстрее, то возникают новые

условия на его поверхности. По мнению Sololov'ev (2010), в случае более быстрого вращения центральной части звезды, по сравнению с остальным объемом, должен возникнуть «омега-эффект» — намотка магнитного поля в тороидальную структуру. Это приводит к генерации крупномасштабного магнитного поля и появлению его на поверхности. Очевидно, при меньшей угловой скорости намотка тоже имеет место. Поскольку такого эффекта в магнитных звездах не наблюдается, то можно сделать вывод, что магнитные звезды целиком вращаются твердотельно. Надо учитывать также, что внутри магнитных звезд структура магнитного поля в большинстве случаев крайне не симметрична относительно центра и конвективного ядра. Поэтому в случае возникновения новых предположений о механизмах взаимодействия конвективного ядра с окружающей областью, они должны учитывать наличие асимметрии, имеющей вековую стабильность. Максимальный возраст He-r- и He-w-звезд имеет порядок  $6 \times 10^7$  и  $3 \times 10^8$  лет соответственно. При максимальном теоретическом времени омической диссипации магнитного поля  $t \approx 10^{11}$  лет можно считать, что полный магнитный поток у звезд этого типа постоянен. Характерные структуры магнитного поля сохраняются у гелиевых звезд всех возрастов, как и среди мало массивных звезд, что показывает на их вековую стабильность.

## 18. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате рассмотренных выше данных можно сделать предварительный вывод об основных свойствах звезд с гелиевыми аномалиями.

1. Семейство He-r- и He-w-магнитных звезд продолжает последовательность Si- и SrCrEu-звезд в сторону более высоких температур, а их свойства во многом совпадают. Это предполагает

одинаковый механизм их формирования и эволюции.

2. Гелиевые звезды отличаются от нормальных звезд более низкими скоростями вращения  $v \sin i$ , как и магнитные CP-звезды других типов. Потеря момента вращения, вероятно, произошла в период коллапса магнитных протозвезд посредством действия механизма Mouschovias–Paleologou (Mouschovias and Paleologou 1979), на ZAMS они приходят уже как медленные ротаторы (рис. 4). He-g-звезды это самые быстрые ротаторы среди других CP-звезд (рис. 3). He-g-, He-w-звезды имеют вдвое меньше магнитное поле, чем менее массивные звезды Si-, SrCrEu-типа (рис. 2). Скорости вращения гелиевых звезд меньше отличаются от нормальных звезд, чем у SrCrEu-объектов (рис. 3). Предполагается, что это происходит из-за слабого магнитного торможения в стадии магнитных протозвезд, вследствие их короткого времени эволюции, слабого магнитного поля и большой массы. На ГП происходит только небольшое увеличение периода вращения из-за роста радиуса (рис. 4 и 5). Рост скорости вращения продолжается до того момента, когда происходит перестройка внутренней структуры в диапазоне  $R/R_z = 1.75–2.2$  (рис. 10). В этот период радиус уменьшается, магнитное поле растет (рис. 4, 5, 9, 11 и 12). В стадии HАеВе магнитное торможение не могло произойти вследствие слабого, запутанного после фазы Хаяши поля. В поверхностных слоях звезд HАеВе полоидальные структуры не могут существовать вследствие турбулентной неустойчивости, вызываемой аккрецией. В начале горизонтальной ветви диаграммы ГР формируются лучистые звезды и конвективное ядро. Очевидно, в этот период времени наступают условия релаксации сложного, запутанного магнитного поля. Мелкие структуры вследствие омических потерь исчезают очень быстро. Кроме того свойства натяжения магнитных силовых линий приводят к упорядочению структур в более однородную форму. По-видимому, третьей причиной роста магнитного поля после ZAMS является исчезновение нестационарной оболочки после прекращения аккреции. Появление полоидального крупномасштабного магнитного поля влечет за собой появление химических аномалий вследствие диффузии химических элементов в спокойной нетурбулизованной атмосфере под действием гравитации и лучевого давления. Стационарность внутренних слоев магнитных звезд происходит из-за медленного вращения. Граница разрушения магнитных звезд приходится на период  $P = 1^d–1.5^d$  (рис. 18) вследствие появления дифференциального вращения. Рост химических аномалий при увеличении магнитного поля связан с подавлением микротурбулентности

магнитным полем. При достижении поля 2–4 кГс турбулентность подавляется полностью и рост содержания элементов прекращается (рис. 13). Зависимости содержания гелия от магнитного поля у звезд He-g и He-w на ГП различны (рис. 14, 15 и 16) вследствие различия эффектов гравитации и ветра. Структуры магнитных полей гелиевых звезд такие же как и у менее массивных CP-звезд и не изменяются с возрастом вследствие твердотельности вращения (рис. 8).

3. Следующий важнейший этап эволюции гелиевых звезд приходится на Главную последовательность. На рис. 9а, 9б видно, что на ГП магнитное поле ведет себя так же, как и у звезд Si+SrCrEu-группы. После ZAMS поле растет, достигает максимума и потом падает вследствие эволюционного увеличения радиуса. В период  $R/R_z = 1.75–2.2$  происходит перестройка звезд, диаметр уменьшается, магнитное поле растет. Распределение магнитных звезд поперек полосы ГП определяется распределением магнитного поля (рис. 1 и 12).

4. Большое число однодипольных звезд может быть признаком того, что они формируются в основном из крупномасштабных однородных по плотности облаков. Возможно также, что звезды с центральным диполем формируются из облаков, в которых поле пропорционально плотности. Многодипольные звезды формируются, как мы полагаем, в процессе гравитационного сжатия протозвездных облаков со сложной магнитной структурой, при которой области с максимальной напряженностью поля часто не совпадают с центром звезды. Кроме того, имеются данные (Price et al. 2009), что во время формирования звезд из намагниченного протозвездного облака магнитное поле препятствует плотным областям сливаться, благодаря чему могут возникать неоднородности. Пока нет предположений о механизмах формирования многодипольных магнитных конфигураций в более поздних стадиях эволюции. Чрезвычайно большое различие величин магнитного поля звезд происходит, в первую очередь, вследствие большого диапазона величин поля в протозвездных облаках, это очевидно. Возможно, в некоторой степени неоднородности создаются в период нестационарной фазы Хаяши. Тем не менее, приходится предполагать, что неустойчивость фазы Хаяши достаточно умеренная, поскольку она позволяет сохранить основную полоидальную составляющую магнитной структуры.

5. Характерная ориентация магнитных диполей звезд He-w и He-g такая же, как и у Si+SrCrEu-объектов (рис. 7 и 17). Относительное количество звезд с одинаковой конфигурацией магнитного поля у них совершенно одинаковое (таблица 5).

Это говорит о том, что магнитный механизм потери момента вращения протозвездных магнитных во всем диапазоне масс протозвездных облаков один и тот же. Одновременно, рассмотренное свойство свидетельствует о том, что внутри магнитных звезд нет крупномасштабных движений газа, иначе соотношение количества звезд с разной структурой изменялось бы. Таким образом, мы получаем дополнительное свидетельство о твердотельном вращении звезд (Glagolevskij 2016). Значительная доля звезд во всем диапазоне возрастов с центральным диполем тоже свидетельствует о твердотельности вращения магнитных звезд.

6. Основные свойства магнитных звезд: 1) сложные структуры магнитных полей, 2) преимущественная ориентация под углом  $\alpha$  магнитных силовых линий относительно плоскости экватора, 3) малая скорость вращения, 4) разделение звезд на магнитные и нормальные в отношении 1:10; твердотельность вращения — скорее всего, произошли в период гравитационного коллапса намагниченных облаков с участием избирательного по отношению угла  $\alpha$  механизма магнитного торможения (Mouschovias and Paleologou 1979). Потеря момента вращения происходит эффективнее в тех облаках, у которых магнитные силовые линии параллельны плоскости вращения. Малая доля (10%) магнитных звезд происходит вследствие избирательного по углу  $\alpha$  механизма магнитного торможения, а также отсутствия магнитного поля у большинства протозвездных облаков. Кажется, трудностью магнитного торможения звезд является то, что нет различия между средними периодами вращения звезд с простыми и сложными магнитными конфигурациями. Вероятность формирования магнитной (и не магнитной) CP-звезды тем больше, чем медленнее звезда вращается. Поэтому утверждается, что только скорость вращения влияет на формирование химически peculiarных звезд и сохранение реликтового магнитного поля (Abt and Morrell 1995). В протозвездах с малой скоростью вращения не формируется дифференциальное вращение, которое у быстрых ротаторов закручивает силовые линии магнитного поля в невидимую тороидальную форму. Граница разделения магнитных и немагнитных CP-звезд от нормальных звезд практически не зависит от массы и приходится в среднем на  $P \approx 1^d - 1.5^d$ . Предварительно можно сделать вывод, что распределение углов  $\alpha$  у гелиевых звезд несколько отличается от распределения у Si+SrCrEu-объектов. У первых из них больше доля звезд с малыми углами  $\alpha$ . Сделано предположение, что это происходит вследствие трудности торможения больших масс и более слабого у них магнитного

поля. Эффективно теряют момент вращения только звезды с наиболее благоприятной ориентацией.

7. Длительные безуспешные поиски прямой зависимости  $B_s(\lg P)$  произошли потому, что она имеет сложный вид. Она существует для гелиевых звезд только до  $B_s = 3$  кГс, после чего она падает (рис. 6). Причина этого свойства пока непонятна.

8. Гелиевые звезды чаще встречаются среди молодых скоплений, чем звезды Si+SrCrEu-типа. Это естественно, потому что они приходят на ZAMS раньше маломассивных звезд. Соответственно, в старых скоплениях, когда на ГП приходят маломассивные звезды, гелиевые объекты уже ее покинули. Период эволюции магнитного поля вблизи ZAMS требует тщательного теоретического обсуждения.

9. Явление выдуваемого газа приводит к ИК-эксцессу в He-г-звездах. Найдено, что инфракрасный эксцесс коррелирует с величиной магнитного поля. Очевидно, что существует оболочка вдоль экватора.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. A. Abt and N. I. Morrell, *Astrophys. J. Suppl.* **99**, 135 (1995).
2. G. Alecian and S. Vauclair, *Astron. and Astrophys.* **101**, 16 (1981).
3. D. A. Bohlender, D. N. Brown, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astrophys. J.* **323**, 325 (1987).
4. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **196**, L109 (1975).
5. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **249**, L39 (1981).
6. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **228**, 809 (1979).
7. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **42**, 421 (1980).
8. E. F. Borra, J. D. Landstreet, and I. Thompson, *Astrophys. J. Suppl.* **53**, 151 (1983).
9. D. N. Brown, J. D. Landstreet, and I. Thompson, in *Chemically peculiar stars of the upper main sequence, Proc. of 23rd Int. Conf. on Astrophysics, June 23-26, 1981, Liege* (Institut d'Astrophysique, Liege, 1981), pp. 195–198.
10. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astron. and Astrophys.* **430**, 1143 (2005).
11. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **394** (3), 1338 (2009).
12. P. S. Conti, *Astrophys. J.* **159**, 723 (1970).
13. S. Ekström, C. Georgy, P. Eggenberger, et al., *Astron. and Astrophys.* **537**, A146 (2012).
14. Y. V. Glagolevskii, F. G. Kopylova, and L. S. Lyubimkov, *Astrophysics* **33** (3), 508 (1990).

15. Y. V. Glagolevskij, in *Physics and Evolution of Stars. Proc. of Int. Meeting, Nizhnii Arkhyz, October 12–17, 1988*, Ed. by Y. V. Glagolevsky and I. M. Kopylov (Nauka, Leningrad, 1988), p. 206.
16. Y. V. Glagolevskij, *Astron. Zhurn.* **71**, 858 (1994).
17. Y. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **41**, 80 (1996).
18. Y. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **46**, 118 (1998).
19. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **62** (3), 244 (2007).
20. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56** (2), 173 (2013a).
21. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56** (3), 407 (2013b).
22. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57** (2), 204 (2014a).
23. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57** (3), 315 (2014b).
24. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **59** (3), 321 (2016).
25. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 418 (2017).
26. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **61** (3), 413 (2018a).
27. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **61** (4), 546 (2018b).
28. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 66 (2019).
29. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* (in press).
30. Y. V. Glagolevskij and N. M. Chunakova, *Izv. Spets. Astrofiz. Obs.* **20**, 37 (1985).
31. Y. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **55**, 38 (2003).
32. Y. V. Glagolevskij, I. K. Iliiev, I. K. Stateva, and G. A. Chountonov, *Astrophysics* **49** (4), 497 (2006a).
33. Y. V. Glagolevskij and F. G. Kopylova, in *Hot CP and magnetic stars*, Ed. by G. Scholz (Potsdam-Babelsberg, 1990), p.82.
34. Y. V. Glagolevskij and F. G. Kopylova, *Izv. Spets. Astrofiz. Obs.* **34**, 131 (1991).
35. Y. V. Glagolevskij, V. V. Leushin, and G. A. Chountonov, in *Spectroscopic methods in modern astrophysics*, Ed. by L. Mashonkina and M. Sachkov (Yanus-K, Moscow, 2007a), pp. 46–51.
36. Y. V. Glagolevskij, V. V. Leushin, and G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **62** (4), 319 (2007b).
37. Y. V. Glagolevskij, V. V. Leushin, G. A. Chountonov, and D. Shulyak, *Astronomy Letters* **32** (1), 54 (2006b).
38. Y. V. Glagolevskij, V. V. Leushin, A. G. Kevlishvili, et al., in *Magnetic Stars, August 27–31, 2003, Nizhnii Arkhyz*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk (Nizhnii Arkhyz, 2004), pp. 198–204.
39. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **73** (2), 201 (2018).
40. Y. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, N. M. Chunakova, and V. G. Shtol', *Izv. Spets. Astrofiz. Obs.* **23**, 37 (1986).
41. Y. V. Glagolevskij, G. P. Topilskaya, and T. A. Kartashova, in *Physics and Evolution of Stars: Stellar Magnetism, Proc. of Int. Meeting, September 30–October 5, 1991, Nizhnii Arkhyz*, Ed. by Yu. Glagolevskij and I. Romanyuk (Nauka, St. Petersburg, 1992) p. 36.
42. D. Groote, K. Hunger, and G. V. Schultz, *Astron. and Astrophys.* **83**, L5 (1980).
43. D. Groote and J. P. Kaufmann, *Astron. and Astrophys.* **94**, L23 (1981).
44. C. Jaschek and M. Jaschek, in *Chemically peculiar stars of the upper main sequence, Proc. of 23rd Int. Conf. on Astrophysics, June 23–26, 1981, Liege* (Institut d'Astrophysique, Liege, 1981), pp. 417–427.
45. M. Jaschek and C. Jaschek, *Vistas in Astronomy* **16** (1), 131 (1974).
46. J. C. Kemp and R. D. Wolstencroft, *Astrophys. J.* **182**, L43 (1973).
47. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **159**, 1001 (1970).
48. J. D. Landstreet and E. F. Borra, *Astrophys. J.* **224**, L5 (1978).
49. J. D. Landstreet, E. F. Borra, J. R. P. Angel, and R. M. E. Illing, *Astrophys. J.* **201**, 624 (1975).
50. V. V. Leushin, Y. V. Glagolevskij, and P. North, in *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Ed. by Y. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Nizhnii Arkhyz, 2000), pp. 173–179.
51. G. Michaud, J. Dupuis, G. Fontaine, and T. Montmerle, *Astrophys. J.* **322**, 302 (1987).
52. T. C. Mouschovias and E. V. Paleologou, *Astrophys. J.* **230**, 204 (1979).
53. P. North, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **55**, 259 (1984).
54. P. North, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **69**, 371 (1987).
55. P. S. Osmer and D. M. Peterson, *Astrophys. J.* **187**, 117 (1974).
56. D. M. Popper, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **54** (319), 160 (1942).
57. G. W. Preston, *Astrophys. J.* **150**, 547 (1967).
58. G. W. Preston, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **83** (495), 571 (1971).
59. D. J. Price, M. R. Bate, and C. L. Dobbs, *Revista Mexicana de Astron. y Astrofis. Conf. Ser.* **36**, 128 (2009).
60. I. I. Romanyuk and E. A. Semenko, *Izv. Krymskoi Astrofiz. Obs.* **103** (3), 101 (2007).
61. A. A. Solov'ev, private communication (2010).
62. I. B. Thompson, D. N. Brown, and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **64**, 219 (1987).
63. S. Vauclair, *Astron. and Astrophys.* **45**, 233 (1975).
64. N. R. Walborn, *Astrophys. J.* **268**, 195 (1983).
65. R. J. Wolff and S. C. Wolff, *Astrophys. J.* **203**, 171 (1976).
66. M. Zboril, Y. V. Glagolevskij, and P. North, in *Proc of Int. Conf. Chemically Peculiar and Magnetic Stars*, Ed. by J. Zverko and J. Ziznovsky (Tatranska Lomnica, 1994), p. 105.
67. M. Zboril, P. North, Y. V. Glagolevskij, and F. Betrix, *Astron. and Astrophys.* **324**, 949 (1997).

## **Evolutionary Features and Other Characteristics of Magnetic Stars with Helium Anomalies (He-r, He-w)**

**Yu. V. Glagolevskij**

We critically review the results of earlier studies on magnetic stars with anomalous helium lines. We discuss the issues associated with the fossil-field theory and the scenario of the formation of magnetic stars. A special feature of the results of our study is that they are derived from more than 160 direct estimates of average surface magnetic fields  $B_s$  or models obtained by the method. The difficulty of this work is in the insufficient amount of data on He-r stars. The problem is caused by a great decrease of the  $v \sin i$  values of stars at the time of internal restructuring.

Keywords: *stars: chemically peculiar*