

УДК 524.31.084-337; 524.3-54

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭВОЛЮЦИИ СИЛЬНО ЗАМАГНИЧЕННЫХ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ ЗВЕЗД В УСЛОВИЯХ МАГНИТОИНДУЦИРОВАННОГО ПОДАВЛЕНИЯ У НИХ КОНВЕКТИВНОГО ВЫНОСА ЭНЕРГИИ.

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2022 В. Н. Аитов<sup>1\*</sup>, Г. Г. Валявин<sup>1\*\*</sup>, А. Ф. Валеев<sup>1,2</sup>,  
Г. А. Галазутдинов<sup>2,1</sup>, А. С. Москвитин<sup>1</sup>, Г. Ш. Митиани<sup>1</sup>, Э. В. Емельянов<sup>1</sup>,  
Т. А. Фатхуллин<sup>1</sup>, К. А. Антонюк<sup>2,1</sup>, А. Р. Закинян<sup>3</sup>, С. А. Куникин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

<sup>3</sup>Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017 Россия

Поступила в редакцию 2 февраля 2022 года; после доработки 15 апреля 2022 года; принята к публикации 28 апреля 2022 года

Представлено исследование влияния магнитоиндуцированного контроля внешней конвекции у звезд разных типов, в частности, у белых карликов, на их тепловую эволюцию. Для проверки высказанного нами ранее утверждения о том, что для остывающих белых карликов, исчерпавших источники термоядерного горения, остановка конвекции магнитным полем значительно замедляет их остывание, выполнена наблюдательная программа поиска новых сильно замагниченных белых карликов. Построена наблюдаемая функция светимости сильно замагниченных белых карликов с остановленной конвекцией и проведено ее сравнение с известной аналогичной функцией светимости белых карликов со слабыми полями, допускающими эффективный конвективный вынос тепла из их недр. В результате модельного анализа этих функций подтверждена гипотеза о том, что сильно замагниченные белые карлики остывают медленнее слабомагнитных. Качественно рассмотрено влияние магнитного торможения конвекции у звезд солнечного типа и звезд — холодных М-карликов главной последовательности — на периодичность их радиационной активности. Обсуждаются геофизический аспект проблемы и практическое приложение контроля магнитным полем теплоотвода в электропроводящих средах.

Ключевые слова: *звезды: белые карлики — звезды: магнитные поля — звезды: эволюция*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитные поля в разной степени влияют на эволюцию звезд, изменяя энергетику их внешних слоев и создавая специфические радиационные условия в их окружениях. В частности, генерируемые Солнцем локальные сильномагнитные структуры, взаимодействуя друг с другом, индуцируют вспышечные процессы высокой энергетики. Это, в свою очередь, оказывает непосредственное влияние на радиационный фон вокруг планет и на эволюцию жизни на Земле.

Другой яркий пример того, как магнитные поля влияют на эволюцию космических тел, связан с белыми карликами (БК), которые имеют поверхностные магнитные поля очень высокой на-

пряженности — от нескольких мегагаусс и выше, вплоть до одного гигагаусса (МБК, Kepler et al. (2013)). Сравнение энергетических бюджетов внешних слоев подобных звезд показывает, что в таких белых карликах магнитные поля глобально контролируют конвекцию, создавая специфическое, стабильное во времени, но геометрически неоднородное распределение яркости на их поверхностях. Этот вывод был сделан нами в предыдущем исследовании (Valyavin et al. 2014). В том же исследовании установлено, что глобальный контроль конвекции у МБК приводит к существенному уменьшению их светимостей вследствие торможения конвективного выноса энергии, что значительно (в два–три раза) тормозит эволюцию процесса их остывания. В результате самые сильномагнитные, все еще наблюдаемые в оптическом диапазоне белые карлики являются реликтовыми потомками одних из самых старых звезд промежуточных и

\*E-mail: vit9517@sao.ru

\*\*E-mail: gvalyavin@gmail.com

больших масс. Подобное явление, связанное с блокировкой магнитным полем выноса тепловой энергии из недр звезд, в небольшой степени наблюдается и на Солнце в моменты максимумов солнечной активности, что непосредственно влияет на эволюцию земного климата и жизни на Земле (Foukal et al. 2006). В настоящей работе мы рассматриваем вопрос о влиянии процессов подавления внешней конвекции у белых карликов и некоторых других звезд на особенности их эволюции.

Данная работа преследует три цели. Первая цель связана с проведением поляризационных астрофизических наблюдений для получения нового наблюдательного материала для теоретического исследования тепловой эволюции и определения поправок к теории эволюции сильномагнитных вырожденных звезд — белых карликов. То есть решается наблюдательная задача, связанная с набором статистики известных МБК разных температур (возрастов) для их дальнейшего сравнения со статистикой слабомагнитных обычных белых карликов. Решение этой задачи представлено в работе Aitov et al. (2022) и здесь не детализируется.

Второй целью являлось создание эволюционной модели остывающей, изначально нагретой звезды в условиях контроля магнитным полем конвективного выноса тепла наружу. Решение этой модельной задачи в приложении к магнитным белым карликам позволит теоретически получить поправки, которые объяснят результаты наблюдений.

Третья цель настоящей работы — обсуждение эффектов локального подавления конвекции у звезд солнечного типа и глобального — у холодных звезд — М-карликов. Мы также рассматриваем прикладной и геофизический аспекты проблемы контроля теплоотвода магнитным полем.

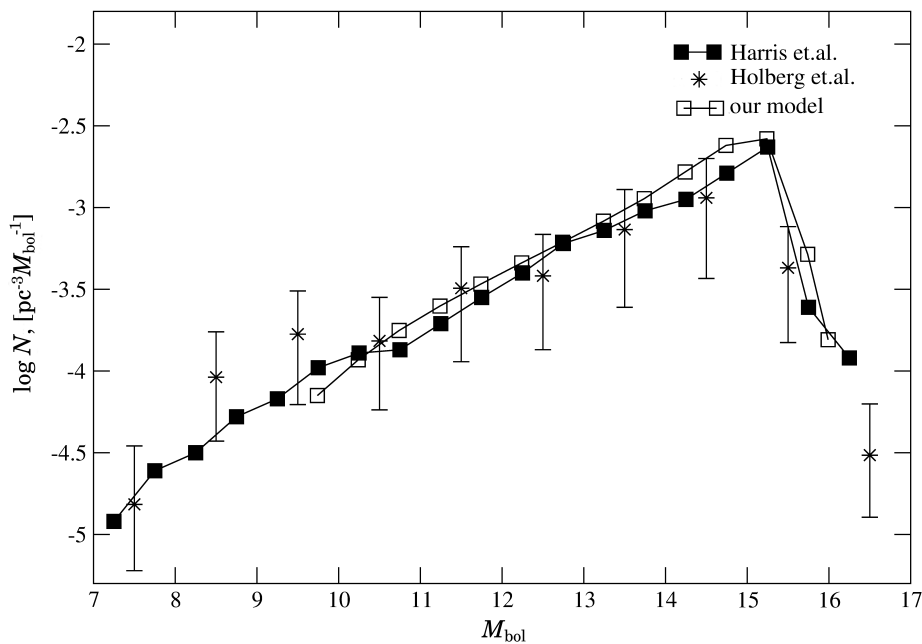
## 2. ФУНКЦИЯ СВЕТИМОСТИ МБК И ЕЕ МОДЕЛЬ С УЧЕТОМ ПОДАВЛЕНИЯ КОНВЕКЦИИ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Для анализа физических свойств эволюции магнетизма МБК с возрастом мы решили провести моделирование функций светимости наблюдаемой совокупности белых карликов и МБК. Функция светимости, ее характер в зависимости от роста болометрической величины, является одним из основных инструментов исследования эволюции звезд. Наша конечная задача состоит в нахождении разницы между формами функций светимости для всех белых карликов и для МБК. Для этого далее мы моделируем функции светимости как для всей совокупности белых карликов ближайшего солнечного окружения, так и для МБК. И в заключение для исследования эволюционных особенностей МБК мы строим функцию встречаемости МБК в зависимости от их болометрической величины (главного индикатора возраста БК) и исследуем форму этой функции.

### 2.1. Наблюдаемые функции светимости белых карликов и МБК в ближайшем солнечном окружении 25 пк

Для построения наблюдаемых функций светимости для всех известных белых карликов в объеме 25 пк (Holberg et al. 2016) и всех МБК в том же объеме, наряду с данными Holberg et al. (2016), мы использовали данные из работ других авторов, а также наши собственные, опубликованные ранее (Antonyuk et al. 2016; 2019, Bagnulo and Landstreet 2021; 2020, Bagnulo et al. 2018, Bagnulo and Landstreet 2018, Berdyugin et al. 2022, Kawka et al. 2007, Sion et al. 2014, Valyavin et al. 2005; 2008; 2011; 2014). В общей сложности функции светимости построены примерно для 240 белых карликов из ближайшего солнечного окружения до расстояний 25 пк. Мы применяли методологию, представленную в работе Sion and Liebert (1977). Результат показан на рис. 1. Статистическая неточность рассчитывалась с использованием метода Монте-Карло генерации случайного процесса с выборками случайных чисел. Для сравнения на рисунке приведена «каноническая» функция светимости белых карликов (Harris et al. (2006)). Как можно видеть, наш вариант функции светимости белых карликов не отличается от «канонической» с точностью до статистических ошибок.

Следуя ровно той же методологии, мы построили наблюдаемую функцию светимости МБК. Результат представлен на рис. 2. Отношение площадей фигур под кривыми функций светимости всей совокупности белых карликов на рис. 1 и МБК на рис. 2 равно примерно 10, что характеризует среднюю частоту встречаемости МБК с мегагауссными и более магнитными полями около 10%. Это значение точно до ошибок в общем не противоречит исторически сложившимся оценкам частоты встречаемости МБК (Fabrika and Valyavin 1999, Liebert and Sion 1979, Liebert et al. 2003, Valyavin and Fabrika 1999). Однако поведение этой частоты встречаемости в зависимости от возраста (грубо — болометрической величины) демонстрирует значительную переменность. На рис. 3 наблюдаемые частоты (заполненные и пустые квадраты) монотонно и значимо увеличиваются с ростом болометрической величины МБК. Этот эффект впервые был отмечен в работе Либерта и Сайона (Liebert and Sion 1979) и до сих пор не исследован детально. Высказано лишь несколько гипотез, одну из которых (Valyavin et al. 2014) мы рассматриваем здесь. Согласно этой гипотезе, как уже говорилось выше, торможение выноса тепла из недр остывающего МБК в развивающейся конвективной зоне начиная с эффективных температур  $T_{\text{eff}} < 11\,000\text{ K}$  — стадии тепловой эволюции БК примерно, с точностью до разности в радиусах МБК, соответствующей



**Рис. 1.** Наблюдаемые функции светимости для известных белых карликов ближнего солнечного окружения из работы Harris et al. (2006) (черные квадраты, соединенные линиями) и в объеме 25 пк по данным Holberg et al. (2016) (звездочки с их статистическими неточностями). Наша модель функции светимости белых карликов, построенная на основе эволюционных последовательностей Salaris et al. (1997), проиллюстрирована пустыми квадратами, соединенными линиями.

$M_{\text{bol}}$  в интервале между  $11^{\text{m}}$  и  $13^{\text{m}}$  — ведет к замедлению остывания и задерживает МБК на эволюционной шкале по сравнению со слабомагнитным белым карликом. Начиная с этих величин, должен иметь место постепенный рост частоты встречаемости МБК, что и наблюдается (Рис. 3). Теперь наша задача — попытаться смоделировать процесс исходя из простейших предположений о механизме уменьшения выноса тепла (с учетом обозначенного порога).

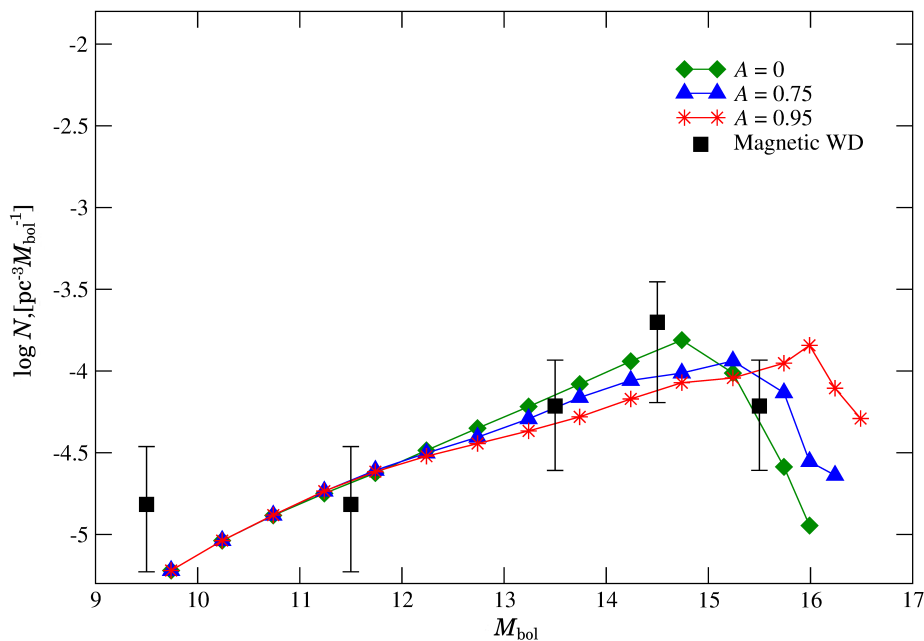
## 2.2. Моделирование функций светимости всей совокупности белых карликов и МБК ближайшего солнечного окружения

Для моделирования функции светимости наблюдаемой совокупности белых карликов в ближайшем солнечном окружении мы использовали теоретические эволюционные последовательности белых карликов с кислородно-углеродным ядром (Salaris et al. 1997). Эти последовательности рассчитывают модельную сетку времен и темпов эволюции в зависимости от абсолютных светимостей белых карликов разных масс. Используя эту сетку вместе с известным распределением по массам белых карликов в объеме ближайшего солнечного окружения (Holberg et al. 2016), мы построили синтетическую функцию светимости для белых карликов как функцию их плотности в единице пространства и болометрической звездной величины в зависимости от болометрической звездной

величины. В рамках неточности значения примерно в одну звездную величину такая функция является индикатором тепловой эволюции белого карлика: чем больше болометрическая величина, тем белый карлик старше.

Сконструированная нами теоретическая функция светимости белых карликов приведена на рис. 1. Как уже указывалось выше, на рис. 1 также представлены наблюдаемые функции светимости для известных белых карликов ближнего солнечного окружения из работы Harris et al. (2006) и в объеме 25 пк по данным Holberg et al. (2016) — черные квадраты и звездочки соответственно. Как нетрудно заметить, в рамках статистических неточностей все функции идентичны. «Завал» функции правее  $M_{\text{bol}} = 15^{\text{m}}$  отражает предельные времена эволюции белых карликов. Тот факт, что точки наблюдаемой функции светимости лежат систематически еще ниже теоретической функции, объясняется также наблюдательной селекцией: белые карлики в этой области слабы и их количество может быть до сих пор недооценено. И в особенности это касается МБК, число которых в этой области действительно недооценено в силу сложности проведения точных поляризационных наблюдений объектов такой яркости.

По части модели остывания МБК с внешней конвективной оболочкой, контролируемой магнитным полем, к настоящему моменту нами, безотносительно модели конкретной звезды, создана об-



**Рис. 2.** Наблюдаемая функция светимости для известных МБК в объеме 25 пк (черные квадраты), включая детектированные в настоящей работе кандидаты, и модельные функции светимости МБК для трех различных значений константы  $A$  (подробнее см. в тексте).

щая модель, рассчитывающая поправку к локальной и интегральной светимостям поверхности самогравитирующей, изначально нагретой системы в условиях подавления конвекции ее внешних слоев. Рассмотрим эту модель более подробно.

Термодинамическая система модели состоит из центрального нагретого тела и проводящего тепло внешнего сферически симметричного слоя, в котором на определенных этапах эволюции может развиваться конвекция. Анализ этой абстрактной модели в контексте астрофизических приложений позволил в самом общем виде свести задачу к практически реализуемому простому формализму, с помощью которого может быть рассчитан поток энергии (светимость) поверхности системы с учетом контроля конвекции магнитным полем:

$$L_{\text{mag}}(t) = \frac{L_{\text{nomag}}(t) \times (F_{\text{conv}} \times [1 - \langle A(B) \rangle] + F_{\text{rad}})}{(F_{\text{conv}} + F_{\text{rad}})} \quad (1)$$

Здесь  $L_{\text{mag}}$  — светимость с учетом магнитного поля, контролирующего конвекцию,  $t$  — время остывания системы,  $T_{\text{eff}}$  — эффективная (в данном случае поверхностная) температура звезды,  $L_{\text{nomag}}$  — светимость без учета магнитного поля,  $F_{\text{conv}}$  и  $F_{\text{rad}}$  — конвективный и лучистый выносы энергий в общей энергетике переноса тепла из недр системы наружу. Магнитное поле, в зависимости от его интенсивности, управляет той долей в общем выносе энергии, которая связана с конвективным переносом тепла  $F_{\text{conv}}$ . В присутствии магнитного

поля  $|B|$  конвективный перенос энергии уменьшается на фактор  $\langle A(|B|) \rangle$  (находится в интервале 0–1), что сказывается на темпе остывания системы. Значки « $\langle \rangle$ » означают усреднения параметра по всей поверхности белого карлика вследствие неоднородности распределения магнитного поля  $|B|$  по этой поверхности. На самом деле, в случае сложных магнитных полей обсуждаемая формула имеет гораздо более сложный вид вследствие неоднородностей не только поля, но и связанных температурных неоднородностей. Например, в приложении к белым карликам с характерными магнитными полями менее 1 МГс торможение конвекции имеет очень сложный вид, формирует на поверхностях развитую пятнистую структуру, анализ которой требует построения температурных и магнитных карт. Этот подход нами также применяется в 3D-моделировании яркостных неоднородностей слабомагнитных МБК, например, в статье Valyavin et al. (2014). В контексте же построения статистических функций достаточно использовать усредненные величины.

Параметры  $F_{\text{conv}}$  и  $F_{\text{rad}}$  рассчитываются с применением метода моделей атмосфер звезд. Мы традиционно используем модель «line-by-line», представленную Шуляком и др. (Shulyak et al. 2004). В случае очень сильных магнитных полей (например, белых карликов с крупномасштабными поверхностными магнитными полями более одного мегагаусса), параметр  $\langle A(|B|) \rangle$  от  $|B|$  уже не зависит или зависит слабо в силу того, что в этом

случае магнитное поле настолько велико, что даже сильно неоднородное поле полностью и одинаково контролирует конвекцию внешних слоев в любой точке поверхности. В этом случае  $\langle A \rangle$  может быть в первом (хотя и грубом) приближении принята свободной константой, которая подбирается в каждом конкретном физическом случае индивидуально. В этой работе мы исходили из этого приближения.

На основании представленного выше формализма нами построено несколько вариантов функции светимости для МБК. Для их построения мы также использовали эволюционные последовательности Салариса и др. (Salaris et al. 1997) и распределение МБК по массам, представленное в работе Kawka et al. (2007). Для каждого конкретного значения константы  $\langle A \rangle$  в интервале 0–1 эволюционные последовательности Салариса и др. корректировались с учетом уменьшения светимости МБК за счет подавления конвективного переноса с фактором  $\langle A \rangle$ . В частности, значение  $\langle A \rangle = 0$  соответствует случаю отсутствия подавления конвективного выноса энергии магнитным полем, а значение  $\langle A \rangle = 1$  — случаю полного подавления конвекции магнитным полем, при котором остается только лучистый перенос энергии  $F_{\text{rad}}$ .

Три модельных варианта функции светимости для МБК представлены на Рис. 2 в сравнении с наблюдаемой функцией светимости (черные квадраты со своими статистическими неточностями). Первый, базовый, вариант со значением константы  $|A| = 0$  (отсутствие влияния магнитного поля на эволюционный вынос энергии у МБК) обозначен зелеными ромбами. Два других варианта рассчитаны для случаев существенного подавления конвективного выноса энергии магнитным полем со значениями константы  $|A| = 0.75$  (синие треугольники) и  $|A| = 0.95$  (красные звездочки).

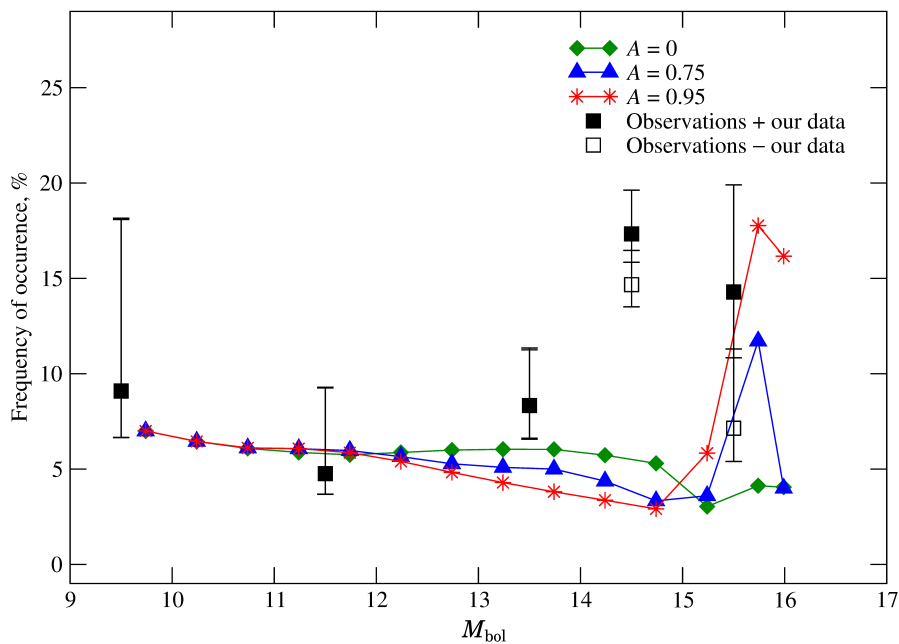
Формальное сравнение этих функций с наблюдениями дает лучшие варианты со значениями константы  $|A|$  в интервале от 0 до 0.75 с довольно большим статистическим разбросом. Между тем эти два варианта функции светимости и все промежуточные плохо согласуются либо вообще не согласуются с поведением частот встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной звездной величины (см. Раздел 2.3). Наилучшее согласие по частотам встречаемости, хотя тоже проблемное, дает вариант с  $|A| = 0.95$ . В этом случае функция светимости вместе с ее экстремумом (Рис. 2) значимо смещается в область меньших светимостей (бóльших значений болометрической звездной величины) из-за значительного (95%) подавления конвективного выноса энергии из недр МБК. Это расхождение подразумевает физическую нереальность таких экстремальных значений параметра  $|A|$ . Однако, несмотря на это, мы не можем

отбросить такое решение. Дело в том, что оценка количества известных старых белых карликов со сверхсильными магнитными полями и низкими светимостями по настоящий момент сильно занижена. Наше исследование эту недооценку подтверждает. А значит, крайняя правая из полученных по наблюдательным данным точек на рис. 2 может оказаться выше и считать модель с параметром  $|A| = 0$  наилучшим вариантом для описания наблюдаемой функции светимости МБК ошибочно. Поведение функции частот встречаемости МБК в зависимости от их болометрической звездной величины (см. рис. 3) подкрепляет уверенность в правильности такого заключения.

### 2.3. Частота встречаемости МБК как функция болометрической звездной величины

На рис. 3 проиллюстрировано поведение частот встречаемости МБК в зависимости от их болометрической звездной величины — главный результат настоящего исследования. Зависимость получена делением функций светимости МБК на общую функцию светимости белых карликов. Результаты наблюдений представлены незаполненными и черными квадратами. В данном случае мы включили в рассмотрение МБК ближайшего солнечного окружения в объеме радиусом 25 пк. Пустые квадраты соответствуют результатам наблюдений, полученных до наших широкополосных поляризационных исследований (Aitov et al. 2022), заполненные — с использованием результатов этих наблюдений. Замечена одна общая тенденция — значимое увеличение частоты встречаемости МБК с увеличением их болометрической величины (уменьшением яркости). Этот эффект уже давно обсуждается многими авторами (Fabrika and Valyavin 1999, Liebert and Sion 1979, Liebert et al. 2003, Sion et al. 2014, Valyavin and Fabrika 1999). Попытка объяснить данный эффект тем, что МБК в среднем имеют бóльшую массу и вследствие этого меньшие радиусы, что тоже уменьшает интегральную светимость вырожденной звезды, не выдерживает критики. Несмотря на то, что имеется разница между средней массой обычного белого карлика (около  $0.56 M_{\odot}$ ) и средней массой МБК ( $0.83 M_{\odot}$ ) и неопределенность в разнице их радиусов составляет величину менее  $1 M_{\text{bol}}$ , эффект увеличения частоты встречаемости покрывает в несколько раз бóльший интервал болометрических звездных величин. Это, в свою очередь, означает, что эффект увеличения частоты встречаемости МБК с ростом болометрической величины имеет именно эволюционную природу: частота встречаемости растет с возрастом.

Согласно высказанной ранее идее (Valyavin et al. 2014), начиная с определенных значений



**Рис. 3.** Частота встречаемости МБК как функция болометрической величины. Пустые квадраты — все известные и подтвержденные МБК, черные квадраты — все МБК, включая кандидаты, детектированные в настоящей работе. Модельные частоты встречаемости показаны для трех различных значений константы  $A$ , отражающей степень подавления конвективного выноса энергии магнитным полем.

температур МБК (10 000 К и ниже), когда у белого карлика развивается конвекция, ее подавление магнитным полем приводит к уменьшению его светимости, замедлению остывания и к увеличению популяции МБК в этой температурной области. Поэтому частота встречаемости МБК повышена в области температур менее 10 000 К.

Эта идея подтверждается настоящими расчетами синтетической функции светимости МБК. Вариант без учета магнитоиндуцированного подавления эволюционного выноса энергии,  $|A| = 0$  (Рис. 3 — зеленые ромбы, соединенные сплошной линией) не демонстрирует увеличения частоты с возрастом вообще. Наоборот, в этом случае частота встречаемости МБК эволюционно должна только уменьшаться. И это интуитивно понятно: более массивные белые карлики с большими магнитными полями (Kerler et al. 2013), имея меньшие радиусы, должны остывать медленнее на всей возрастной шкале с самого своего рождения. Соответственно, и частоты их встречаемости должны монотонно падать с возрастом на всей шкале.

В двух других вариантах смоделированной функции светимости МБК с сильным влиянием подавления конвективного выноса энергии ( $|A| = 0.75$  и  $|A| = 0.95$ ) ситуация принципиально иная. Мы видим резкое увеличение частоты встречаемости МБК с возрастом (Рис. 3). Увеличение частоты происходит по двум причинам: за счет уменьшения светимости белого карлика вследствие подавления конвективного выноса энергии на

его поверхность и вследствие того, что такие белые карлики начинают медленнее эволюционировать. В результате МБК в избытке накапливаются в низкотемпературном конце их функции светимости, что приводит к резкому увеличению их частот встречаемости; это и демонстрируют два варианта модели с  $|A| = 0.75$  и  $|A| = 0.95$ .

Несмотря на то, что самая низкотемпературная часть функции светимости при больших болометрических звездных величинах объясняется в рамках предложенной нами модели, в которой мы отдаем предпочтение параметру  $|A|$  с самым высоким значением, соответствующим подавлению 95% доли конвективного выноса тепла, поведение функции в интервале болометрических величин между  $13^m$  и  $15^m$  также противоречит наблюдениям. В данной, первичной, работе мы оставляем эту проблему открытой, ссылаясь на несовершенство используемого нами модельного подхода (см. также качественные объяснения, представленные в следующем разделе).

### 3. ДИСКУССИЯ

Наши наблюдения (Aitov et al. 2022) вместе с данными других исследователей (Antonyuk et al. 2016; 2019, Bagnulo and Landstreet 2021; 2020, Bagnulo et al. 2018, Bagnulo and Landstreet 2018, Berdyugin et al. 2022, Kawka et al. 2007, Sion et al. 2014, Valyavin et al. 2005; 2008; 2011; 2014) позволили нам построить наблюдаемую функцию

светимости сильно замагниченных белых карликов с остановленной конвекцией и сравнить ее с известной аналогичной функцией светимости белых карликов со слабыми полями, допускающими эффективный конвективный вынос тепла из их недр. В результате модельного анализа этих функций нами показано, что без учета влияния магнитного поля на конвективный вынос энергии наблюдаемый эффект увеличения частоты встречаемости МБК с возрастом не объясняется. Мы предложили простейший формализм, который дал нам возможность показать, что учет магнитного поля позволяет объяснить этот эффект.

Возникшая трудность в части расхождения модели с наблюдениями в области промежуточных времен эволюции МБК (на функции светимости между  $13^m$  и  $15^m$ ) объясняется несовершенством используемой модели. Скорее всего, проблема связана с недоучетом в расчете конвективного выноса тепла других химических элементов, например, гелия, который хотя и не наблюдается в атмосферах белых карликов подкласса DA, главным образом представленных в настоящей работе, он все же должен присутствовать в недрах вырожденных звезд, в частности, в слое вокруг изотермического ядра — основного резервуара тепла, запасенного белым карликом в процессе предшествующей эволюции. Главным результатом этой работы мы считаем представление качественно новых аргументов для объяснения физики торможения эволюции МБК их магнитными полями.

Любопытно также, что полученный нами коэффициент  $|A| = 0.75-0.95$ , наиболее адекватно описывающий самый низкотемпературный интервал функции светимости при больших болометрических звездных величинах в рамках предложенной нами модели, приблизительно совпадает с отношением (примерно 0.8) между светимостями на несвободной от пятен поверхности Солнца и в центрах пятен, где конвекция полностью подавлена. Этот факт также говорит в пользу справедливости нашего утверждения о решающем влиянии величины магнитного поля на конвекцию и, в конечном итоге, на тепловую эволюцию белых карликов.

Идеи, предложенные в этой работе и ранее (Valyavin et al. 2014), критиковались в статье Tremblay et al. (2015). Среди прочих основным аргументом авторами назывался тот факт, что поверхностная конвекция на белых карликах происходит в строго адиабатическом режиме, без обмена теплом с окружающей средой. Следовательно, влияния на эволюцию она не оказывает. Действительно, установившийся во внешних слоях звезд адиабатический режим конвекции сам по себе не добавляет вынос тепла. Вся конвективная энергия в таком режиме направлена на поддержание адиабатического градиента температуры в

конвективном слое (Mihalas 1978). Между тем подавление конвекции магнитным полем изменит этот градиент до радиационного (Mihalas 1978), что уменьшит светимость фотосферы звезды и, как результат, уменьшит транспорт энергии из недр звезды наружу. И эта конфигурация вполне может быть устойчивой, существовать сколь угодно долго в том случае, если в основном тепловом резервуаре звезды отсутствует горение, поставляющее дополнительную энергию для изменения радиационного градиента в направлении увеличения светимости и возвращения темпа эволюции в исходное русло. У белых карликов таких источников энергии нет, они просто остывают, поэтому способны сколь угодно долго находиться в состоянии с пониженной светимостью по сравнению с их слабомагнитными двойниками. Однако, если мы имеем дело с сильномагнитными звездами, поля которых останавливают конвекцию везде в их внешних слоях и в центрах которых горит термоядерный котел, такие звезды, вероятно, могут демонстрировать периодическую активность, связанную с экстренным сбросом накопленных под фотосферой излишков энергии. Рассмотрим в качестве дискуссии случай с некоторыми конвективно-активными звездами.

### *3.1. Холодные M-карлики с сильными магнитными полями*

Динамо-генерация магнитных полей, имеющая место у холодных конвективно-спокойных звезд, чрезвычайно интересна для исследования их эволюции и эволюции их окружений (особенно применительно к их планетным системам). Интересны они и в контексте настоящего исследования.

Известно (Reiners et al. 2022), что холодные M-карлики имеют средние по поверхности магнитные поля на порядки больше, чем солнечное глобальное поле (около 1 Гс). Согласно Reiners et al. (2022), эти звезды имеют в среднем 800-гауссные магнитные поля, которые в отдельных случаях достигают значений в несколько килогаусс. В этом случае поля таких величин также способны останавливать поверхностную конвекцию у M-карликов, на время понижая их общую светимость, потому что, в отличие от белых карликов, в недрах M-карликов идут термоядерные реакции, что в случае остановки конвекции неизбежно приведет к дополнительному разогреву звезды и, как результат, к генерации тепловой вспышки значительной интенсивности, которая отведет накопившееся «лишнее» тепло. После такой «глобальной» вспышки либо после серии вспышек меньшей интенсивности процесс неизбежно повторится.

В связи с вышесказанным любопытно, что, вероятно, наиболее энергоемкие вспышки наблюдаются у M-карликов именно с килогауссными

полями. В частности, недавнее открытие синхротронного излучения в момент гигантской вспышки ( $dV = +3^m!$ ) у вспыхивающего M-карлика UV Ceti (Beskin et al. 2017) объяснило присутствие крупномасштабного килогауссного магнитного поля на поверхности этой звезды. В этом контексте наше исследование может быть рассмотрено в том числе и в приложении к теории звездных вспышек.

### *3.2. Солнечная активность, геофизический и прикладной аспекты проблемы контроля конвективного выноса тепла внешним магнитным полем*

Наконец, затронем геофизический и прикладной аспекты проблемы контроля конвективного отвода тепла магнитным полем.

В работе Foukal et al. (2006) представлены результаты многолетних болометрических измерений интегрального потока от Солнца. Показано, что интегральный поток солнечной радиации антикоррелирует с числом солнечных пятен, экранирующих поток от Солнца в моменты максимумов солнечной активности 11-летнего цикла. В моменты блокировки радиации пятнами структурами, подавляющими конвективный вынос энергии, недопоставленная наружу энергия в пятнах конвертируется в другие виды энергий (включая нетепловые), что вместе с аннигиляцией локальных магнитных структур вызывает общее увеличение радиации от Солнца. Общий избыток энергии в моменты максимумов солнечной активности, как показывают радиометрические данные, невелик для того, чтобы оказывать серьезное влияние, в частности, на эффект глобального потепления на Земле. Однако общее влияние процесса на качество жизни населения Земли является значительным. И все это так или иначе связано опять же с экранированием конвективного выноса тепла из недр Солнца магнитными полями в пятнах, что иллюстрирует важность продолжения исследований.

Потенциально интересным является также вопрос о контроле магнитным полем выноса тепла с поверхности Земли. Конвекция в той или иной мере присутствует в разные периоды времени на разных высотах атмосферы Земли, в том числе в ионосфере. Наши весьма предварительные и поэтому не обсуждаемые в этой работе оценки отношения возможных бюджетов радиационной и конвективной составляющих выносимой с поверхности Земли энергии в самых верхних слоях атмосферы оказались малы для того, чтобы вносить соответствующую поправку в теорию парникового эффекта. Однако мы оставляем этот вопрос для дальнейшего рассмотрения в силу его социальной важности.

Наконец, решение сформулированной в работе задачи имеет и прикладной аспект, связанный с развитием методов бесконтактного контроля теплопроводности. Термостатирование магнитным полем через подавление конвекции возможно не только в плазме, но и в любых электропроводящих жидкостях (например, в ртути или в магнитной жидкости). В качестве независимой проверки эффекта контроля транспорта тепла в жидких проводящих средах магнитным полем мы провели соответствующий лабораторный эксперимент. Стратегической задачей этой части наших исследований является выявление конкретных физических механизмов, с помощью которых магнитное поле контролирует теплопроводность жидкой электропроводящей среды. В лабораторном эксперименте по изучению влияния магнитного поля на геометрию развивающихся конвективных течений и на динамику изменения температуры нагретого тела, помещенного в магнитный коллоид, мы получили положительные результаты по контролю теплопроводности магнитного коллоида внешним магнитным полем (Zakinyan et al. 2021). Результаты исследования подтверждают выводы настоящей работы и демонстрируют возможности практического использования их для создания бесконтактных систем контроля теплоотвода.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 18-29-21030 мк. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. N. Aitov, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3) (2022) [in press].
2. K. A. Antonyuk, S. V. Kolesnikov, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 475 (2016).
3. K. A. Antonyuk, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **74**, 172 (2019).
4. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507**, 5209 (2021).
5. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **643**, id. A134 (2020).
6. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, A. J. Martin, and G. Valyavin, *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **48** 236 (2018).



7. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **618**, 42 (2018).
8. A. V. Berdyugin, V. Piirola, S. Bagnulo, et al., *Astron. and Astrophys.* **657**, id. A105 (2022).
9. G. Beskin, S. Karpov, V. Plokhhotnichenko, et al., *Publ. Astron. Soc. Australia*, **34**, id. e010 (2017).
10. S. Fabrika and G. Valyavin, *ASP Conf. Ser.* **169**, 214 (1999).
11. P. Foukal, C. Fröhlich, H. Spruit, and T. M. L. Wigley, *Nature* **443**, 161 (2006).
12. H. C. Harris, J. A. Munn, M. Kilic, et al., *Astron. J.* **131**, 571 (2006).
13. J. B. Holberg, T. D. Oswalt, E. M. Sion, and G. P. McCook, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462**, 2295 (2016).
14. A. Kawka, S. Vennes, G. D. Schmidt, et al., *Astrophys. J.* **654**, 499 (2007).
15. S. O. Kepler, I. Pelisoli, S. Jordan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 2934 (2013).
16. J. Liebert and E. M. Sion, *Astrophys. Lett.* **20**, 53 (1979).
17. J. Liebert, P. Bergeron, and J. B. Holberg, *Astron. J.* **125**, 348 (2003).
18. D. Mihalas, *Stellar atmospheres* (W. H. Freeman, San Francisco, 1978).
19. A. Reiners, D. Shulyak, P. J. Käpylä, et al., eprint arXiv:2204.00342 (2022).
20. M. Salaris, I. Dominguez, E. Garcia-Berro, et al., *Astrophys. J.* **486** (1), 413 (1997).
21. E. M. Sion and J. Liebert, *Astrophys. J.* **213**, 468 (1977).
22. E. M. Sion, J. B. Holberg, T. D. Oswalt, et al., *Astron. J.* **147**, id. 129, (2014).
23. D. Shulyak, V. Tymbal, T. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys.* **428**, 993 (2004).
24. P.-E. Tremblay, G. Fontaine, B. Freytag, et al., *Astrophys. J.* **812**, id. 19, (2015).
25. G. Valyavin and S. Fabrika, *ASP Conf. Ser.* **169**, 206 (1999).
26. G. Valyavin, S. Bagnulo, D. Monin, et al., *Astron. and Astrophys.* **439**, 1099 (2005).
27. G. Valyavin, G. A. Wade, S. Bagnulo, et al., *Astrophys. J.* **683**, 466 (2008).
28. G. Valyavin, K. Antonyuk, S. Plachinda, et al., *Astrophys. J.* **734**, id. 17 (2011).
29. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, et al., *Nature* **515**, 88 (2014).
30. A. Zakinyan, S. Kunikin, A. Chernyshov, and V. Aitov, *Magnetochemistry*, **7** (2), id. 21 (2021).

## Studies of Features of Evolution of Highly Magnetized White Dwarfs and Some Other Stars under Conditions of Magnetically Induced Suppression of Convective Energy Removal. II. Modeling

V. N. Aitov<sup>1</sup>, G. G. Valyavin<sup>1</sup>, A. F. Valeev<sup>1,2</sup>, G. A. Galazutdinov<sup>2,1</sup>, A. S. Moskvitin<sup>1</sup>, G. Sh. Mitiani<sup>1</sup>, E. V. Emelianov<sup>1</sup>, T. A. Fatkhullin<sup>1</sup>, K. A. Antonyuk<sup>2,1</sup>, A. R. Zakinyan<sup>3</sup>, and S. A. Kunikin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

<sup>3</sup>North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017 Russia

We present a study of the influence of magnetically induced control of external convection in stars of different types, in particular white dwarfs, on their thermal evolution. In the work preceding this study, we argued that for the cooling down white dwarf stars that have exhausted the sources of thermonuclear combustion, cessation of convection by a magnetic field significantly slows down their cooling. To test this assertion, we performed an observational program to search for new highly magnetized white dwarfs. The program is described in detail in the same issue of the journal. Our observations, together with the observations of other researchers, allowed us to construct the observed luminosity function of strongly magnetized white dwarfs with stopped convection and compare it with the well-known similar luminosity function of white dwarfs with weak fields that allow effective convective heat removal from their insides. As a result of the model analysis of these functions, the hypothesis that strongly magnetized white dwarfs cool down slower than weakly magnetic ones is confirmed. The article also qualitatively examines the effect of magnetic braking of convection in solar-type stars and cool M-dwarf stars of the Main Sequence on the periodicity of their radiation activity. The geophysical aspect of the problem and the practical application of magnetic field control of the heat removal in electrically conductive media are discussed.

Keywords: *stars: white dwarfs—stars: magnetic field—stars: evolution*